



TUGAS AKHIR - TE 145561

**DESAIN PERALATAN UJI PERFORMANSI DAN
PARAMETER MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT
(BLDC)**

Hendry Erwantono
NRP 07111645000052

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani S.T., M.T., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 145561

**DESAIN PERALATAN UJI PERFORMANSI DAN
PARAMETER MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT*
(BLDC)**

Hendry Erwantono
NRP 07111645000052

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani S.T., M.T., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 145561

**DESIGN OF PERFORMANCE AND PARAMETER TESTER
FOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR**

Hendry Erwantono
NRP 07111645000052

Advisor
Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

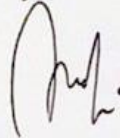
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Desain Peralatan Uji Performansi dan Parameter Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 5 Juli 2018



Hendry Erwantono
NRP. 07111645000052

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**DESAIN PERALATAN UJI PERFORMANSI DAN
PARAMETER MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)**

TUGAS AKHIR

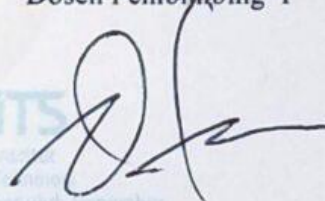
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

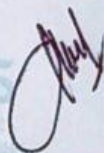
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dimas Anton Asfani S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198109052005011002



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DESAIN PERALATAN UJI PERFORMANSI DAN PARAMETER MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)

Nama : Hendry Erwantono
Pembimbing I : Dimas Anton Asfani S.T., M.T., Ph.D.
Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Skuter listrik membutuhkan rangkaian pengendali untuk menggerakkan dan mengendalikan motor *Brushless Direct Current* (BLDC). Untuk mendesain kontroler, perancang memerlukan beberapa parameter motor yang tidak disediakan oleh produsen. Penelitian ini mempresentasikan desain peralatan uji performansi dan parameter untuk BLDC dalam aplikasi skuter listrik. Parameter yang diteliti adalah tahanan stator, induktansi stator, konstanta Back Electromotive Force (BEMF) konstanta torsi, momen inersia, dan gaya gesek. Untuk mendapatkan parameter ini, mikrokontroler digunakan untuk memproses beberapa sinyal keluaran dari tegangan, kecepatan, arus, hambatan, dan sensor induktansi. Resistansi dan induktansi diuji sebelum motor dioperasikan. Motor kemudian diberi masukan *unit step*. Selama 5 detik motor berjalan, mikrokontroler mencatat kecepatan dan data arus. Setelah itu, motor itu tidak dialiri listrik. Mikrokontroler mencatat kecepatan dan kembali EMF tegangan pada setiap fase motor pada saat terdapat putaran sisa motor. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan dapat mengukur parameter motor, seperti resistansi stator 0,078 ohm, induktansi stator 76,52 μH , konstanta *back* EMF 20,28 volt/krpm, konstanta torsi 0,1936 Nm/A, gaya gesek sebesar 0,0174 Nms, dan momen inersia sebesar 0,0471 kgm^2 .

Kata Kunci : motor BLDC, resistansi, induktansi, arus, konstanta BEMF, kecepatan, momen inersia, koefisien gesek

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DESIGN OF PERFORMANCE AND PARAMETER TESTER FOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR

Name : Hendry Erwantono
Advisor I : Dimas Anton Asfani S.T., M.T., Ph.D.
Advisor II : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The electric scooter needs a controller to drive and control brushless direct current (BLDC) motor. To design a controller, the designer needs some motor parameters that may not be provided by manufacturer. This paper presented a design of performance and parameter measurement system for BLDC in electric scooter application. The investigated parameters were stator resistance, stator inductance, Back Electromotive Force (BEMF) constant, speed, torque constant, inertia moment, and friction. To obtain these parameters, a microcontroller was used to process some output signals from voltage, speed, current, resistance, and inductance sensor. Resistance and inductance were tested before motor was operated. The motor was then given a unit step. During 5 s of motor running, the microcontroller recorded speed and current data. After that, the motor was unpowered. Later, the microcontroller recorded speed and back EMF voltage on each motor phase. The results revealed that the proposed system could measure the main motor parameters, such as 0.078 ohm of stator resistance, 76.52 μH of stator inductance, 20.28 volt/krpm of back EMF constant, 0.1936 Nm/A of torque constant, 0.0174 Nms of friction, and 0.0471 kgm^2 .

Keywords— motor BLDC, resistance, inductance, current, speed, back EMF constant, torque constant, inertia moment, and friction coefficient value

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul:

“DESAIN PERALATAN UJI PERFORMANSI DAN PARAMETER MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)”

Tugas Akhir ini merupakan sebagian syarat untuk menyelesaikan mata kuliah dan memperoleh nilai pada Tugas Akhir. Dengan selesainya Tugas Akhir ini penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah banyak membantu untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam Tugas Akhir ini. Kritik dan saran untuk perbaikan tugas ini sangat diperlukan. Akhir kata semoga tugas ini dapat bermanfaat.

Surabaya, 5 Juli 2018

Hendry Erwantono
NRP. 07111645000052

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
 BAB I.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Laporan.....	3
1.7 Relevansi	4
 BAB II.....	 5
2.1 Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC)	5
2.2 Stator.....	5
2.3 Rotor..	6
2.4 <i>Hall Sensor</i>	7
2.5 Teori Komutasi.....	8
2.6 Karakteristik Torsi dan Kecepatan	9
2.7 Kendali <i>Loop</i> Tertutup Motor BLDC.....	10
2.8 Kendali Motor BLDC tanpa Sensor	11
2.9 Parameter Motor BLDC	12
2.2.1 Parameter Elektris	12
2.2.2 Parameter Elektris Mekanis.....	13
 BAB III	 17
3.1 Sensor untuk Mengukur Resistansi	17
3.2 Pengujian Sensor Resistansi	18
3.3 Sensor untuk Mengukur Induktansi	19
3.4 Pengujian Sensor Induktansi	22

3.5 Sensor untuk Mengukur Tegangan <i>Back Electromotive Force</i> ...	22
3.6 Pengujian Sensor Tegangan BEMF	23
3.7 Sensor Arus Tamura L01Z.....	26
3.8 Pengujian Sensor Tamura L01Z	27
3.9 Sensor untuk Mengukur Kecepatan Motor	27
3.10 Pengujian Sensor Kecepatan LM393	29
3.11 Perancangan Tampilan.....	30
BAB IV	33
4.1 Prosedur Pengujian Resistansi dan Induktansi Motor.....	34
4.2 Prosedur Pengujian Konstanta BEMF Motor	35
4.3 Prosedur Pengujian Konstanta Torsi Motor	36
4.4 Prosedur Pengujian Koefisien Gesek Motor	36
4.5 Penentuan Konstanta Waktu Mekanis	37
4.6 Prosedur Pengujian Momen Inersia Motor	47
4.7 Prosedur Pengujian Tampilan	48
BAB V	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	55
BIODATA PENULIS	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Motor BLDC yang terhubung dengan rangkaian kendali dan sumber tegangan searah	5
Gambar 2.2	Bentuk gelombang 2 jenis motor BLDC.....	6
Gambar 2.3	(a) inti bulat dengan magnet di sekelilingnya, (b) inti bulat dengan magnet persegi ternanam di rotor, dan (c) inti bulat dengan magnet yang dimasukkan ke inti rotor ..	7
Gambar 2.4	Potongan melintang motor BLDC	8
Gambar 2.5	Sinyal sensor <i>hall</i> , tegangan BEMF, torsi, dan arus fase	9
Gambar 2.6	Kurva karakteristik torsi terhadap kecepatan	10
Gambar 2.7	Rangkaian kendali BLDC dengan sensor <i>hall</i>	11
Gambar 2.8	Rangkaian kendali BLDC tanpa sensor <i>hall</i>	12
Gambar 3.1	Sensor resistansi untuk menguji fase UV (a), UW (b), dan VW (c).....	18
Gambar 3.2	Sensor induktansi untuk menguji induktansi fase UV (a), UW (b), dan VW (c)	20
Gambar 3.3	(a) sinyal yang dibangkitkan oleh Arduino, (b) sinyal resonansi, dan (c) sinyal keluaran komparator.....	21
Gambar 3.4	Grafik sinyal resonansi dan keluaran komparator.....	21
Gambar 3.5	Sensor tegangan BEMF	23
Gambar 3.6	Sensor arus Tamura L01Z.....	26
Gambar 3.7	Sensor kecepatan optik dengan LM393	28
Gambar 3.8	Keping <i>encoder</i> 1 lubang	28
Gambar 3.9	Sinyal keluaran sensor kecepatan	28
Gambar 3.10	ST Motor Control Workbench v4.3	29
Gambar 3.11	Diagram alur perancangan tampilan dengan LabVIEW ..	30
Gambar 3.12	Hasil rancangan tampilan dengan LabVIEW	32
Gambar 4.1	Skema baterai, pengedali, penguji, dan motor BLDC	33
Gambar 4.2	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 1.....	38
Gambar 4.3	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 2.....	39
Gambar 4.4	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 3.....	40
Gambar 4.5	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 4.....	41
Gambar 4.6	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 5.....	42

Gambar 4.7	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 6	43
Gambar 4.8	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 7	44
Gambar 4.9	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 8	45
Gambar 4.10	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 9	46
Gambar 4.11	Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi <i>transient</i> pengujian 10	47
Gambar 4.12	Pengujian tampilan resistansi fase (a) UV, (b) UW, dan (c) VW	48
Gambar 4.13	Pengujian tampilan induktansi fase (a) UV, (b) UW, dan (c) VW	49
Gambar 4.14	Parameter motor BLDC pada tampilan	50

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Pengujian sensor resistansi	18
Tabel 3.2 Pengujian sensor induktansi	22
Tabel 3.3 Pengujian sensor tegangan fase U	24
Tabel 3.4 Pengujian sensor tegangan fase V	24
Tabel 3.5 Pengujian sensor tegangan fase V (lanjutan)	25
Tabel 3.6 Pengujian sensor tegangan fase W	25
Tabel 3.7 Pengujian sensor arus Tamura L10Z	27
Tabel 3.8 Pengujian sensor kecepatan optik LM393	29
Tabel 4.1 Tabel pengujian resistansi motor	34
Tabel 4.2 Pengujian induktansi motor	34
Tabel 4.3 Pengujian untuk mendapatkan nilai konstanta BEMF	35
Tabel 4.4 Pengujian koefisien gesek	36
Tabel 4.5 Pengujian 1 untuk menentukan konstanta waktu mekanis	37
Tabel 4.6 Pengujian 2 untuk menentukan konstanta waktu mekanis	38
Tabel 4.7 Pengujian 3 untuk menentukan konstanta waktu mekanis	39
Tabel 4.8 Pengujian 4 untuk menentukan konstanta waktu mekanis	40
Tabel 4.9 Pengujian 5 untuk menentukan konstanta waktu mekanis	41
Tabel 4.10 Pengujian 6 untuk menentukan konstanta waktu mekanis ..	42
Tabel 4.11 Pengujian 7 untuk menentukan konstanta waktu mekanis ..	43
Tabel 4.12 Pengujian 8 untuk menentukan konstanta waktu mekanis ..	44
Tabel 4.13 Pengujian 9 untuk menentukan konstanta waktu mekanis ..	45
Tabel 4.14 Pengujian 10 untuk menentukan konstanta waktu mekanis ..	46
Tabel 4.15 Kesimpulan penentuan konstanta waktu mekanis	47

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi transportasi menuntut inovasi untuk penggunaan peralatan yang ramah lingkungan dan efisien tetapi memberikan manfaat yang sama atau bahkan lebih baik dibanding peralatan yang sudah ada. Kendaraan roda dua yang sudah ada menggunakan motor bakar sebagai penggerak dan berbahan bakar olahan minyak bumi. Oleh sebab itu, perlu adanya inovasi salah satunya berupa kendaraan roda dua dengan penggerak motor listrik dan bersumber daya listrik. Motor *brushless direct current* (BLDC) dinilai menjadi motor yang tepat karena memiliki beberapa keuntungan dibandingkan motor lain. Beberapa keuntungan tersebut adalah memiliki efisiensi relatif tinggi, tahan lama, keandalan tinggi, memerlukan lebih sedikit perawatan dibanding motor bersikat, dan dapat mencapai kecepatan yang lebih tinggi dibanding motor bersikat. [1]

Dengan digunakannya motor BLDC, maka perlu peralatan yang mampu untuk melakukan pengukuran parameter dan penguji kelayakan motor BLDC. Hal ini dikarenakan suatu motor BLDC memiliki parameter tertentu agar dapat digunakan dalam kendaraan listrik roda dua. GESITS merupakan inovasi kendaraan roda dua berbasis listrik yang memerlukan kriteria BLDC tertentu. Dengan demikian, peralatan yang dimaksud dapat digunakan untuk mengukur parameter dan menguji performansi suatu motor BLDC. Jika suatu motor BLDC memenuhi kriteria GESITS, maka motor BLDC tersebut dapat digunakan sebagai motor penggeraknya.

Di sisi lain, perancangan kontroler motor BLDC memerlukan 6 parameter. 6 parameter tersebut adalah resistansi, induktansi, konstanta torsi, konstanta *Back Electromotive Force* (BEMF), momen inersia, dan koefisien gesek. Setelah suatu motor diketahui parameternya, maka tahap selanjutnya adalah merancang kontroler dan pemodelannya dalam MATLAB. [2]

1.2 Permasalahan

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat rumusan masalah yang akan menjadi pembahasan. Rumusan masalah yang dimaksud adalah

1. Mendapatkan nilai resistansi dan induktansi motor BLDC.
2. Menguji motor BLDC untuk mendapatkan karakteristik performa, arus tunak, kecepatan tunak, nilai koefisien gesek, konstanta *back*

electromotive force, konstanta torsi, dan momen inersia dengan menggunakan mikrokontroler dan sensor.

3. Menampilkan parameter tersebut dalam sebuah tampilan dengan menggunakan mikrokontroler dan perangkat lunak.

1.3 Batasan Masalah

Motor BLDC yang dimaksud adalah motor yang digunakan sebagai penggerak sepeda motor GESITS. Motor yang diuji dianggap memiliki keadaan belitan simetris, magnet tidak bersaturasi, tidak ada arus *eddy*, celah udara seragam, dan induktansi mutual diabaikan. Parameter yang akan didapatkan adalah resistansi, induktansi, arus kutub negatif baterai, konstanta *Back Electromotive Force* (BEMF), konstanta torsi, koefisien gesek, dan momen inersia. Sedangkan performansi yang dimaksud adalah respon kecepatan motor saat diberi masukan *unit step* dan diuji selama 500 milidetik pertama.

1.4 Tujuan

Tugas akhir yang diusulkan memiliki tujuan merancang peralatan yang terdiri dari komponen elektronika, mikrokontroler, sensor, dan tampilan untuk mendapatkan nilai resistansi, induktansi, arus kutub negatif baterai, konstanta *Back Electromotive Force* (BEMF), konstanta torsi, koefisien gesek, dan momen inersia.

1.5 Metodologi Penelitian

Dalam tugas akhir ini menggunakan metode penelitian sebagai berikut

1. Studi pustaka dan literasi

Tahap ini merupakan pengumpulan pustaka dari penelitian yang sudah diterbitkan sebelumnya dan percobaan terhadap pengujian BLDC. Pustaka penunjang meliputi karakteristik motor BLDC, pengambilan parameter motor BLDC, peralatan untuk mengambil dan menampilkan parameter BLDC.

2. Pengintegrasian Mikrokontroler, Sensor, dan Tampilan

Tahap ini adalah perancangan, perangkaian, dan pemrograman mikrokontroler terhadap masukan sensor dan keluaran tampilan. Ketiga komponen tersebut harus dapat saling terhubung dan berkomunikasi dengan benar. Sensor berfungsi sebagai perangkat masukan yang datanya dikirimkan ke mikrokontroler. Tampilan berfungsi sebagai perangkat keluaran dengan data yang dikirim oleh mikrokontroler. Mikrokontroler

adalah pusat pengolahan data yang diterima dari sensor dan akan dikirim ke tampilan.

3. Pengujian Mikrokontroler, Sensor, dan Tampilan terhadap Motor BLDC

Peralatan yang telah dibuat sebelumnya diujikan untuk mengambil nilai-nilai elektrik dan mekanis motor BLDC. Pengujian dilakukan pada motor yang digunakan pada sepeda motor GESITS.

4. Analisis dan Pengolahan Data Hasil Pengujian

Nilai-nilai yang ditampilkan oleh peralatan bersifat langsung atau *real time*.

5. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Tugas akhir disusun sejak awal penelitian sampai parameter dan performansi yang didapatkan seakurat mungkin. Dengan demikian, dapat dibuat kesimpulan selama melakukan penelitian tentang pengambilan parameter motor BLDC.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Menjelaskan tentang pendahuluan dari tugas akhir yang meliputi latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab II Teori Penunjang dan Tinjauan Pustaka

Menjelaskan tentang teori penunjang yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian tugas akhir ini.

Bab III Perancangan Sensor, Program, dan Tampilan

Berisi tentang penjelasan dari metodologi yang digunakan dan implementasinya pada rangkaian sensor untuk mendeteksi parameter, program untuk membaca sinyal masukan, dan tampilan untuk menampilkan parameter.

Bab IV Pengukuran dan Pengujian

Berisi tentang pemaparan dan analisis hasil pengujian alat pada keadaan sebenarnya. Seperti pengukuran dan pengujian sensor resistansi dengan tampilannya, induktansi, tegangan terminal, arus konsumsi, kecepatan, dan *Back EMF*.

Bab V Penutup

Berisi tentang kesimpulan atas hasil yang diperoleh serta saran atas kekurangan Tugas Akhir ini.

1.7 Relevansi

1. Untuk institusi

Dengan disusunnya tugas akhir ini diharapkan berguna dalam pengembangan dan penelitian tentang kendaraan riset yang dilakukan oleh Riset Mobil Listrik ITS. Dengan dibuatnya alat tugas akhir ini juga diharapkan mampu memenuhi kebutuhan produk kendaraan listrik GESITS.

2. Untuk bidang ilmu pengetahuan

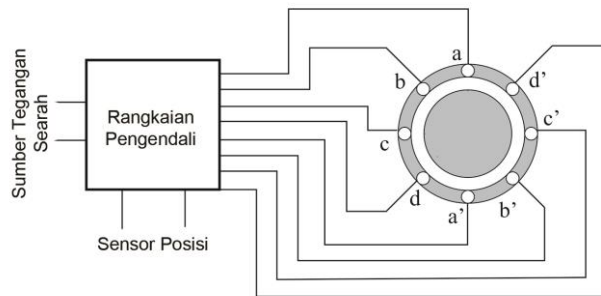
Tugas akhir ini juga dapat dijadikan sebagai referensi pengembangan kendaraan listrik atau penelitian terkait. Dengan demikian, diharapkan penelitian selanjutnya dapat menutupi kekurangan dari penelitian-penelitian yang telah ada.

BAB II

STRUKTUR DAN PARAMETER MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)

2.1 Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)

Motor ini terhubung dengan sumber tegangan searah namun tidak memiliki komutator dan sikat. Motor ini memiliki magnet permanen dengan sensor posisi rotor dan rangkaian pengendali. Statornya dapat terdiri dari 3 fase atau lebih. Rangkaian pengendali motor ini dapat mengatur kecepatan dan sebaiknya juga dapat mengatur arah putaran. [1]



Gambar 2.1 Motor BLDC yang terhubung dengan rangkaian kendali dan sumber tegangan searah

Motor BLDC termasuk dalam jenis motor sinkron. Hal ini berarti medan magnet terbangkit oleh stator dan rotor berada dalam frekuensi yang sama. Motor BLDC tidak memiliki gejala slip yang biasa terjadi pada motor induksi.

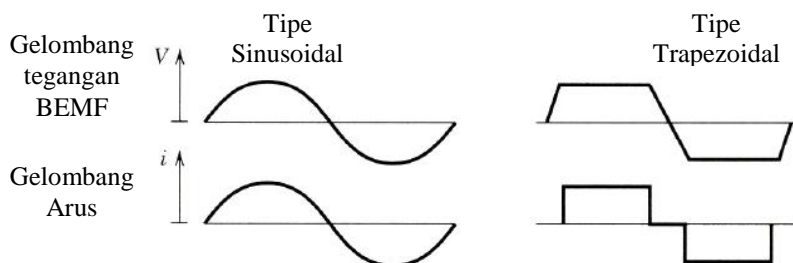
Terdapat beberapa konfigurasi motor BLDC diantara satu fase, dua fase, dan tiga fase. Hal ini mengacu pada jumlah belitan statornya dan BLDC dengan 3 fase lebih banyak digunakan. [3]

2.2 Stator

Motor BLDC memiliki stator yang terdiri dari logam berlaminasi dengan belitan tersusun dalam slot berpotongan secara aksial di sekeliling motor. Stator BLDC disusun seperti halnya stator pada motor induksi. Kebanyakan BLDC memiliki 3 belitan yang tersusun secara bintang. Setiap belitan disusun dengan jumlah gulungan tertentu yang terinterkoneksi

sehingga terbentuk belitan stator. Belitan stator tersebut disusun sedemikian rupa sehingga terbentuk kutub motor.

Terdapat dua jenis belitan stator yaitu motor trapezoidal dan sinusoidal. Perbedaan terjadi karena interkoneksi kumparan dalam belitan stator yang menghasilkan gelombang tegangan *Back Electromotive Force* (BEMF) berbentuk trapesium dan sinusoidal seperti ditunjukkan oleh gambar berikut.



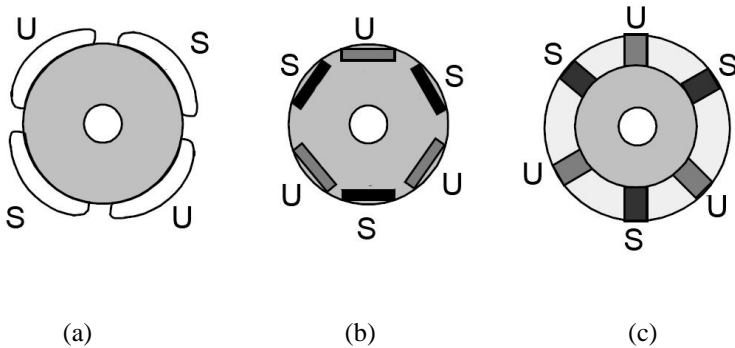
Gambar 2.2 Bentuk gelombang 2 jenis motor BLDC

Motor trapezoidal akan menghasilkan bentuk tegangan BEMF trapesium dan motor sinusoidal akan menghasilkan tegangan BEMF berbentuk sinus. Arus fase juga memiliki bentuk trapezoidal dan sinusoidal bergantung pada jenis motornya. Hal ini membuat torsi keluaran dengan motor sinusoidal lebih halus dibanding motor trapezoidal. Namun hal ini membutuhkan biaya lebih, motor sinusoidal membutuhkan belitan lebih karena peletakan kumparan stator. Dengan demikian, meningkatkan kebutuhan tambahan pada belitan stator.

Berdasarkan kemampuan catu daya, motor dengan tingkat tegangan tertentu untuk stator memiliki kegunaan masing-masing. Empat puluh delapan volt digunakan sebagai otomotif, robotika, dan lengan robot kecil. Motor dengan 100 volt atau lebih digunakan untuk otomotif dan aplikasi industri. [3]

2.3 Rotor

Bagian yang berputar dari motor disebut rotor. Rotor motor BLDC terbuat dari magnet permanen dan terdiri dari 2 hingga 8 pasang kutub dengan penamaan utara dan selatan, ditunjukkan oleh gambar berikut



Gambar 2.3 (a) inti bulat dengan magnet di sekelilingnya, (b) inti bulat dengan magnet persegi tertanam di rotor, dan (c) inti bulat dengan magnet yang dimasukkan ke inti rotor

Berdasarkan rapat jenis medan magnet dalam rotor, bahan magnet memiliki sifat tertentu untuk digunakan sebagai rotor. Pada awalnya bahan ferit digunakan untuk membuat magnet permanen. Dengan berkembangnya teknologi, logam magnet berbahan campuran yang jarang ditemui di bumi menjadi populer. Magnet berbahan ferit menjadi lebih murah meski memiliki kekurangan karena rendahnya kerapatan fluks untuk diberikan dalam suatu ruang. Sebagai perbedaannya, material logam berbahan campuran memiliki kerapatan magnetis terhadap suatu ruang yang tinggi. Magnet berbahan campuran juga memiliki perbandingan ukuran terhadap berat yang lebih bagus dan memberikan torsi lebih tinggi dibanding motor bermagnet ferit meski dengan ukuran motor sama.

Beberapa contoh magnet campuran yang jarang di bumi adalah Neodymium (Nd), Samarium Cobalt (SmCo), dan campuran. Bahan campuran biasanya terdiri campuran dari neodymium, ferit, dan boron (NdFeB). Penelitian selanjutnya dikembangkan untuk meningkatkan kerapatan fluks. Hal ini bertujuan mengurangi ukuran rotor. [3]

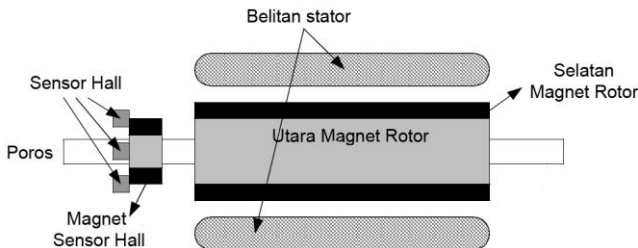
2.4 Hall Sensor

Komutasi motor BLDC tidak dilakukan seperti motor DC bersikat. Motor BLDC dikendalikan secara elektronis. Untuk memutar motor BLDC, belitan stator dicatu secara berurutan. Penting untuk mengetahui urutan posisi rotor untuk menentukan belitan yang akan dicatu. Posisi rotor disensor menggunakan sensor *hall effect* yang tertanam dalam stator.

Kebanyakan motor BLDC memiliki tiga sensor *hall* yang tertanam di stator. Ketika kutub magnet rotor melewati dekat dengan sensor *hall*, sensor akan mendeteksi sinyal *high* atau *low*. Hal ini menandakan kutub utara atau selatan yang sedang melewati sensor. Berdasarkan kombinasi ketiga sinyal sensor *hall*, urutan yang benar untuk komutasi akan ditentukan.

Hall sensor ditempelkan pada bagian yang tidak bergerak pada motor. Penempelan *hall* sensor ke dalam stator adalah proses yang kompleks. Kesalahan peletakan dapat mengakibatkan pembacaan yang salah dalam menentukan posisi rotor. Untuk menyederhanakan proses penempelan *hall* sensor pada stator, beberapa motor memiliki *hall* sensor pada rotornya dengan magnet tambahan. Sehingga saat motor berputar, magnet *hall* sensor memiliki pengaruh yang sama dengan magnet utama.

Berdasarkan posisinya secara fisik, *hall* sensor memiliki 2 macam keluaran. *Hall* sensor memiliki beda jarak fase 60° atau 120° satu sama lain. Dengan demikian, produsen motor dapat menentukan urutan komutasi dan kendali motor. *Hall* sensor juga membutuhkan catu daya 4 hingga 24 volt dan arus dari 5 hingga 15 miliamper. Ilustrasi *hall effect* sensor ditunjukkan pada gambar berikut.

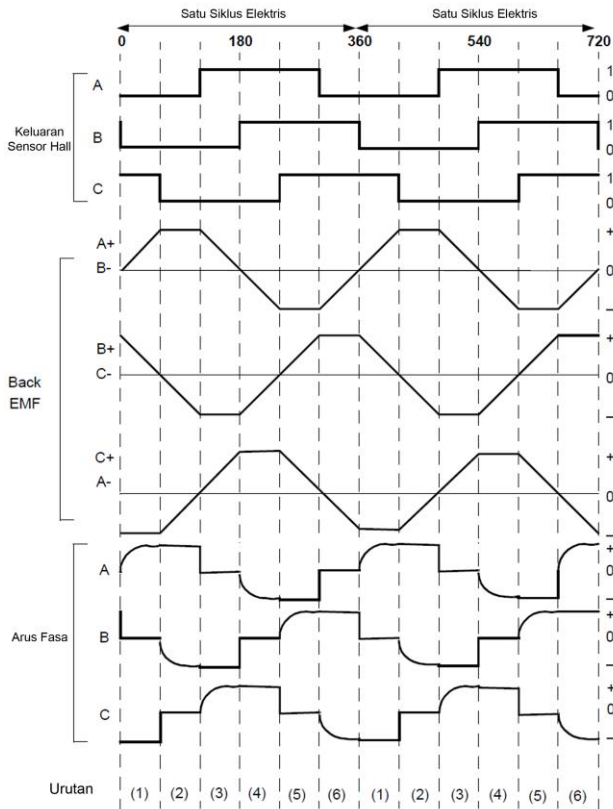


Gambar 2.4 Potongan melintang motor BLDC

2.5 Teori Komutasi

Setiap urutan komutasi memiliki belitan pertama untuk dicatu dengan tegangan positif, belitan kedua dengan tegangan negatif, dan belitan ketiga yang tidak dicatu. Torsi terbangkitkan karena interaksi antara medan magnet terbangkit dengan kumparan stator dan permanen magnet. Secara umum, puncak torsi terjadi saat dua medan berjarak 90° satu sama lain dan jatuh kedua berjauhan. Proses komutasi yang paling sering digunakan adalah komutasi enam tahap. Komutasi ini menentukan urutan belitan yang akan dicatu.

Setiap 60° putaran elektrik, satu *hall* sensor berubah keadaan. Berdasarkan ini, diperlukan enam tahap untuk menyelesaikan siklus elektrik. Dengan setiap 60° elektrik, penyalan arus fase selalu berubah-ubah. Jumlah siklus elektrik yang diulang untuk menyelesaikan putaran mekanis ditentukan oleh jumlah pasang kutub rotor. Gambar berikut menunjukkan sinyal *hall effect* sensor dengan tanggapan dari tegangan BEMF dan arus fase.



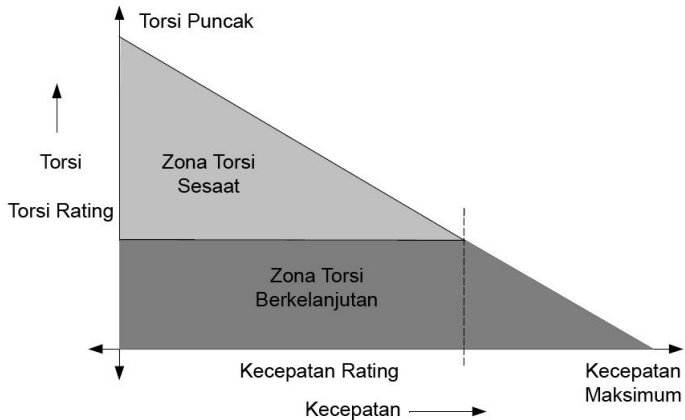
Gambar 2.5 Sinyal sensor *hall*, tegangan BEMF, torsi, dan arus fase

2.6 Karakteristik Torsi dan Kecepatan

Terdapat dua parameter torsi yang digunakan untuk mendefinisikan sebuah motor BLDC, yaitu torsi puncak (T_P) dan torsi *rating* (T_R). Saat

beroperasi, motor dapat dicatu hingga torsi *rating*. Torsi motor menjadi tetap untuk kecepatan tertentu hingga mencapai kecepatan *rating*. Motor dapat dicatu hingga kecepatan penuh, sekitar 150% dari kecepatan *rating*, tetapi torsi mulai berkurang.

Penggunaan yang memerlukan pengawalan dan penghentian atau pemutaran ke arah lawan dengan motor saat berbeban, membutuhkan torsi yang lebih besar dibanding torsi *rating*. Kebutuhan ini menjadi sangat penting. Terutama ketika motor mulai berputar dari keadaan diam. Dalam keadaan ini, torsi tambahan dibutuhkan untuk mengatasi inersia beban dan rotor motor sendiri. Motor dapat dicatu hingga torsi yang lebih besar hingga puncak torsi selama berada dalam kurva kecepatannya sebagaimana dalam gambar berikut.



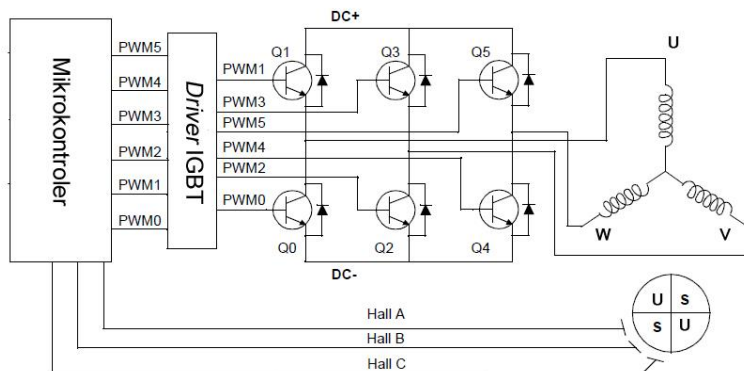
Gambar 2.6 Kurva karakteristik torsi terhadap kecepatan

2.7 Kendali Loop Tertutup Motor BLDC

Kecepatan dapat dikendalikan dalam sebuah *loop* tertutup dengan mengukur kecepatan aktual motor. Kesalahan antara kecepatan masukan dengan kecepatan aktual diperhitungkan. Metode kendali dengan *Proportional Integral and Derivative* (P.I.D) dapat digunakan untuk mengatur kesalahan kecepatan dan siklus kerja *Pulse Width Modulation* (PWM). Untuk mengurangi biaya, sinyal *hall* dapat digunakan untuk mengukur kecepatan. Fitur *timer* pada mikrokontroler dapat digunakan untuk menghitung kecepatan motor antara perubahan dua sensor *hall*. Dengan demikian, kecepatan aktual motor dapat ditentukan.

Pengukuran kecepatan dengan akurasi tinggi dapat menggunakan *encoder* optik yang dipasangkan pada motor. Dengan memberikan dua sinyal yang memiliki beda fase 90° , kedua kecepatan dan arah putaran dapat ditentukan. Kebanyakan *encoder* memberikan indeks sinyal ketiga yang disebut satu pulsa tiap putaran. Hal ini digunakan untuk pengaturan posisi. *Encoder optik* tersedia dengan berbagai pilihan pulsa tiap putarannya, mulai dari ratusan hingga ribuan.

Rangkaian kendali dilakukan dengan 6 buah saklar yang terhubung dengan mikrokontroler. Mikrokontroler membangkitkan sinyal PWM untuk mengatur penyalan komponen *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT). Rangkaian kendali motor BLDC dengan sensor *hall* ditunjukkan pada gambar berikut.

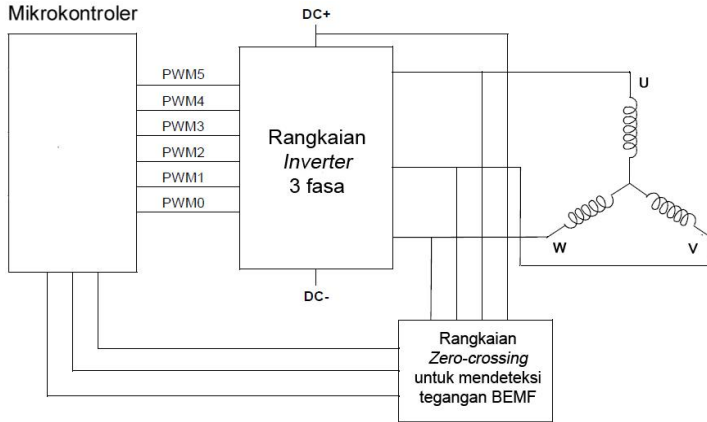


Gambar 2.7 Rangkaian kendali BLDC dengan sensor *hall*

2.8 Kendali Motor BLDC tanpa Sensor

Pada saat ini, banyak dijumpai komutasi berdasarkan posisi rotor dinyatakan dengan sensor *hall*. Motor BLDC dapat dikomutasikan dengan melihat sinyal tegangan BEMF. Hubungan antara sensor *hall* dan tegangan BEMF ditunjukkan pada gambar 2.5. Sebagaimana dapat dilihat bahwa setiap urutan komutasi memiliki satu belitan untuk dicatu dengan tegangan positif, kedua negatif, dan ketiga tidak dicatu. Pada gambar 2.5 juga menunjukkan bahwa keadaan sensor *hall* berubah saat polaritas tegangan BEMF berubah dari positif ke negatif atau sebaliknya. Pada kasus yang ideal, hal ini terjadi pada rangkaian zero-crossing tegangan BEMF, tetapi secara praktis, terjadi jeda karena sifat belitan. Jeda ini dapat dikompensasi

dengan mikrokontroler. Gambar 2.8 merupakan rangkaian kendali BLDC tanpa sensor *hall*. [3]



Gambar 2.8 Rangkaian kendali BLDC tanpa sensor *hall*

2.9 Parameter Motor BLDC

2.2.1 Parameter Elektris

Motor terbuat dari kawat penghantar yang dililit menjadi belitan motor. Pada motor BLDC, rotor terbuat dari magnet permanen sedangkan stator terbuat dari belitan kawat penghantar. Jika belitan ini dilewati oleh arus, maka timbul medan. Karena perpotongan medan dalam motor, maka motor berputar. [1] Belitan stator tersebut dapat timbul resistansi dan induktansi. Resistansi merupakan nilai elektris yang dapat diukur dengan pengukuran tegangan searah. Dengan pengukuran rotor terkunci didapatkan nilai induktansi fasenya. [4]

Suatu motor BLDC yang seimbang dapat diketahui nilai tegangan 3 fase statornya. Persamaan berikut dimisalkan untuk keadaan seimbang [5]

$$V_{(u,v,w)} = L \frac{di_{(u,v,w)}}{dt} + Ri_{(u,v,w)} + e_{(u,v,w)} + V_n \quad (2.1)$$

Dengan R adalah nilai resistansi belitan, L adalah induktansi belitan, e adalah nilai tegangan BEMF, i adalah arus masing-masing fase, V_n adalah tegangan titik netral, u , v , dan w adalah penamaan untuk masing-masing fase.

Pada penelitian lain, penentuan nilai resistansi dapat dilakukan dengan mengukur secara langsung menggunakan RLC meter [2]. Satu pasang terminal fase (contoh U dan V) diukur dengan RLC meter dan diulang untuk 2 pasang kemungkinan fase lainnya (fase UW dan VW). Ketiga nilai tersebut dirata-rata untuk mendapat nilai rata-rata resistansi 1 pasang fase. Nilai rata-rata tersebut dibagi 2 untuk mendapat nilai resistansi 1 fasenya. Persamaan (2.2) untuk mendapat nilai resistansi setelah dilakukan pengukuran. Hal ini juga dapat dilakukan untuk menentukan nilai induktansi. Persamaan (2.3) untuk mendapat nilai induktansi setelah dilakukan pengukuran.

$$R_{fasa} = \frac{R_{UV} + R_{UW} + R_{VW}}{3 \times 2} \quad (2.2)$$

$$L_{fasa} = \frac{L_{UV} + L_{UW} + L_{VW}}{3 \times 2} \quad (2.3)$$

Pada penelitian ini, pengukuran arus stator dilakukan dengan menggunakan sensor arus Tamura. Nilai arus yang terbaca oleh sensor akan diubah menjadi tegangan. Setiap 1 ampere-nya bernilai sekian volt bergantung pada tipe sensor arus Tamura. Keluaran tegangan yang dihasilkan oleh sensor direkam oleh mikrokontroler tiap 100 milidetik dan pengujian dilakukan 3 hingga 5 detik.

2.2.2 Parameter Elektris Mekanis

Ketika suatu motor BLDC berputar, setiap belitan membangkitkan tegangan yang arahnya berlawanan dengan tegangan yang dicatu terhadap belitan. Tegangan ini disebut tegangan BEMF sesuai dengan hukum Lenz [3]. Hal ini juga bergantung pada posisi rotor dan setiap fase memiliki beda sudut 120° . Tegangan BEMF dipengaruhi oleh 3 hal yakni kecepatan radian rotor, medan magnet terbangkit oleh magnet rotor, dan jumlah belitan stator [6].

Pada penelitian lain [2], untuk mendapatkan parameter konstanta BEMF digunakan *hall effect sensor*. Saat dicatu, motor dikendalikan hingga kecepatan tunak. Saat mencapai kecepatan tunak, motor dilepaskan dari catu daya. Pada saat ini, ketiga terminal fasenya diukur tegangannya dan kecepatannya. Untuk mendapatkan konstanta BEMF digunakan persamaan berikut

$$e = k_e \omega_m \quad (2.4)$$

e merupakan tegangan antar fase motor BLDC dinyatakan dalam volt. k_e merupakan konstanta BEMF dinyatakan dalam volt/krpm. ω_m merupakan kecepatan mekanis dinyatakan dalam rad/s yang dikonversi menjadi rpm.

Konstanta torsi motor adalah torsi yang terbangkit dan dibagi dengan arus jangkar. Penentuan nilai konstanta torsi dilakukan dengan melakukan pengukuran arus stator dan kecepatan motor saat kondisi tunak. Kemudian digunakan persamaan berikut

$$k_t = \frac{T_e}{I} \quad (2.5)$$

T_e adalah torsi elektromagnetik, k_t adalah konstanta torsi dinyatakan dalam Nm/A, dan I adalah arus stator dinyatakan dalam A. Untuk menentukan nilai T_e dapat digunakan persamaan berikut

$$P_{mekanis} = T_e \omega_m \quad (2.6)$$

$$P_{elektris} = e_{ll} I \quad (2.7)$$

P adalah daya motor dalam watt, ω_m adalah kecepatan mekanis dalam rad/s, dan e_{ll} adalah tegangan BEMF antar fase. Dengan demikian kedua persamaan tersebut dapat dipersamakan menjadi

$$\begin{aligned} e_{ll} I &= T_e \omega_m \\ \frac{e_{ll}}{\omega_m} &= \frac{T_e}{I} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$\frac{e_{ll}}{\omega_m} = k_e$ dan $\frac{T_e}{I} = k_t$ dengan dilakukan konversi konstanta BEMF dari volt/rpm menjadi volt/rad.s⁻¹ maka berlaku persamaan berikut

$$k_t = \frac{k_e \times 60}{2\pi} \quad (2.9)$$

Konstanta waktu mekanis merupakan waktu yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai kondisi 0,632 dari kondisi tunak [7]. Nilai tersebut didapat dari persamaan 2.10. Suatu motor diberikan masukan *unit step* dengan kecepatan maksimum. Nilai kecepatan dicata oleh

mikrokontroler setiap 100 milidetik dan motor diuji selama 5 detik. Data kecepatan selama 5 detik tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik. Dengan demikian dapat diperoleh konstanta waktu mekanis. [2]

$$c(T) = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (2.10)$$

Parameter selanjutnya adalah koefisien gesek yang dapat diperoleh dengan keadaan motor tanpa beban dan saat kondisi tunak [2]. Dengan demikian dapat berlaku persamaan berikut

$$B = \frac{k_t \times I}{\omega_m} \quad (2.11)$$

B adalah koefisien gesek. ω_m adalah kecepatan dalam satuan rad/s. k_t adalah nilai konstanta torsi dan I adalah arus. Koefisien gesek dinyatakan dalam Nms.

Pada suatu penelitian [8], momen inersia dapat ditentukan melalui percobaan percepatan atau metode osilator. Bagian yang berputar dari motor listrik selalu terbatas. Gerak berputar hanya mungkin dalam satu sumbu meski torsi motor dapat dikendalikan. Pada saat pengujian, waktu t dan perputaran diukur dan dinyatakan dalam θ . Metode percepatan tidak memiliki gerak periodik. Untuk mengurangi kesalahan pengukuran dalam waktu dan posisi diperlukan pengujian yang sangat lama. Pengaruh gesek pada percobaan ini sangatlah besar bergantung pada keadaan *bearing* dan arus *eddy*.

Sebagaimana dinyatakan sebelumnya bahwa putaran hanya dapat terjadi pada satu sumbu. Untuk membuat gerak osilasi, digunakan sebuah pegas lentur dengan nilai K . Metode osilasi adalah periodik. Pengukuran dengan jumlah osilasi mengurangi kesalahan pengukuran.

Kedua metode tersebut memiliki sebab yang dapat dipertimbangkan untuk menentukan nilai inersia yaitu

1. Dengan mengukur osilasi yang sangat besar, kesalahan untuk waktu dan posisi menjadi berkurang.
2. Dengan metode osilasi, pengukuran dapat dimulai setelah sisa gerakan motor terjadi. Kesalahan yang bergantung pada keadaan awal tidak dinyatakan dalam pengukuran.
3. Dari jumlah osilasi, nilai koefisien gesek dapat dihitung. Hal ini terjadi karena posisi dapat dihitung dengan *encoder*.

Pada penelitian lain [2], untuk mendapatkan nilai momen inersia dapat digunakan persamaan berikut

$$J = \frac{\tau_m(R_{LL}B + k_e k_t)}{R_{LL}} \quad (2.12)$$

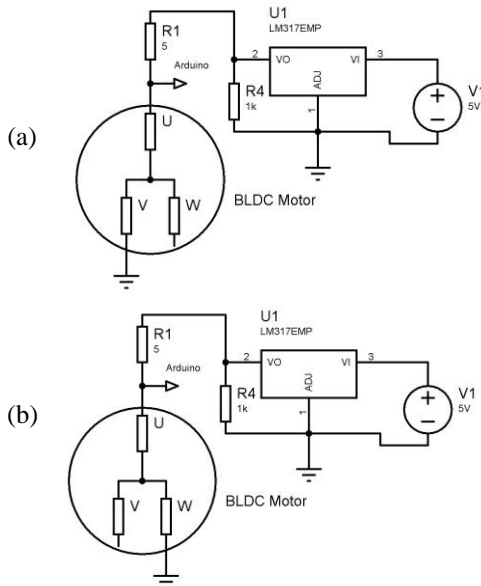
Momen inersia (J) dinyatakan dalam kgm^2 . τ_m adalah konstanta waktu mekanis. R_{LL} adalah nilai resistansi antar fase atau merupakan 2 kali resistansi 1 terminalnya.

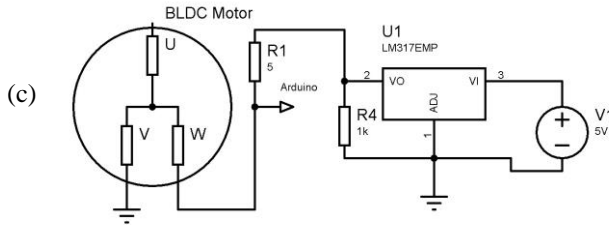
BAB III

PERANCANGAN SENSOR, PROGRAM, DAN TAMPILAN

3.1 Sensor untuk Mengukur Resistansi

Sensor ini menggunakan LM317 yang berfungsi sebagai pembatas tegangan masukan 5 volt menjadi hanya 1,25 volt. Hal ini dapat terjadi karena di dalam LM317 terdapat dioda zener yang membatasi tegangan keluar menjadi 1,25 volt. Pertimbangan tegangan 1,25 volt digunakan karena nilai resistansi pada motor kurang dari 1 ohm. Dengan digunakannya 1,25 volt maka arus yang mengalir pada sensor pengujian diharapkan kurang dari 0,5 A. Rangkaian sensor ini ditunjukkan pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Sensor resistansi untuk menguji fase UV (a), UW (b), dan VW (c)

Prinsip sensor menggunakan hukum pembagi tegangan. Tegangan keluaran dari sensor akan menjadi sinyal masukan bagi Arduino. Sinyal masukan tersebut diubah menjadi besaran biner. Pada program, besaran biner tersebut diolah dengan persamaan 3.1 sehingga dapat diketahui nilai resistansi antar fasenya.

$$R_{fasa-fasa} = \frac{V_{out} R_1}{V_{in} - V_{out}} \quad (3.1)$$

Cara kerja pengukuran alat ini sebagai berikut

1. *probe* alat dipasang pada satu pasang fase motor.
2. terjadi pembagian tegangan. Tegangan ini disebut sebagai V_{out} .
3. V_{out} terbaca oleh Arduino.
4. Arduino melakukan perhitungan sesuai persamaan 3.1.

Misal suatu komponen resistor yang tidak diketahui nilainya diuji dengan alat ini. Pengujian menghasilkan $V_{out} = 0,5 \text{ volt}$. Sesuai persamaan 3.1 maka

$$R_{diuji} = \frac{V_{out} R_1}{V_{in} - V_{out}} = \frac{0,5 \times 5}{1,25 - 0,5} = 2,08 \, \Omega \quad (3.2)$$

3.2 Pengujian Sensor Resistansi

Tabel 3.1 Pengujian sensor resistansi

Resistor	LCR meter	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
5 ohm film	4,49	8,562	47,75	4,42	1,51

Tabel 3.1 Pengujian sensor resistansi (lanjutan)

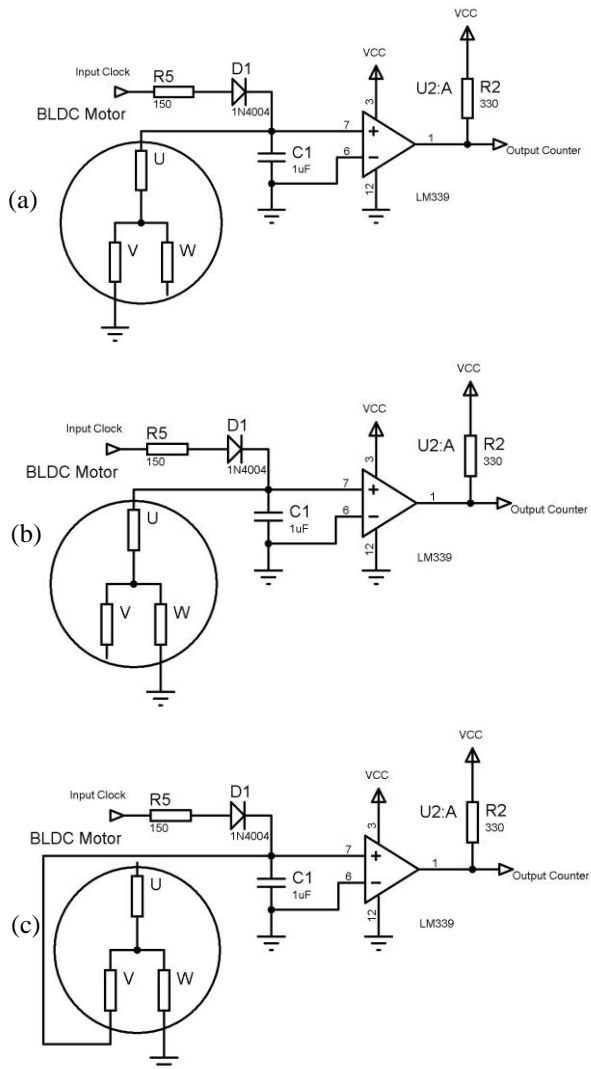
Resistor	LCR meter	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
1 ohm keramik	0,99	1,24	25,95	0,92	6,26
1 ohm film	0,96	1,27	33,22	1,07	12,29
0,5 ohm keramik	0,52	0,59	13,84	0,51	0,38
0,33 ohm keramik	0,39	0,44	13,58	0,40	3,58
Rata-rata					4,80

Pengujian dilakukan pada resistor pabrikan dengan alat ukur LCR meter dan sensor yang dibuat. Dari pengujian, kesalahan rata-rata alat adalah 4,8 % dibanding LCR meter.

3.3 Sensor untuk Mengukur Induktansi

Sensor induktansi memanfaatkan persamaan 3.3 tentang frekuensi resonansi paralel induktansi dan kapasitansi. Rangkaian induktansi dan kapasitansi paralel tersebut diberi masukan digital. Keluaran dari rangkaian tersebut adalah gelombang berfrekuensi sesuai persamaan 3.3. Karena Arduino tidak dapat membaca keadaan tersebut, maka diberi rangkaian tambahan yaitu *operational amplifier* komparator yang berfungsi untuk mengubah gelombang berfrekuensi tersebut menjadi logika 1 dan 0. Sinyal logika ini menjadi masukan bagi Arduino. Selama selang waktu 1 milidetik, Arduino menghitung jumlah logika 1 dan 0. Hasil perhitungan merupakan nilai periode dengan satuan mikrodetik. Hal ini memudahkan untuk perhitungan nilai induktansi dengan satuan mikro Henry.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 F_R^2 C} \quad (3.3)$$



Gambar 3.2 Sensor induktansi untuk menguji induktansi fase UV (a), UW (b), dan VW (c)

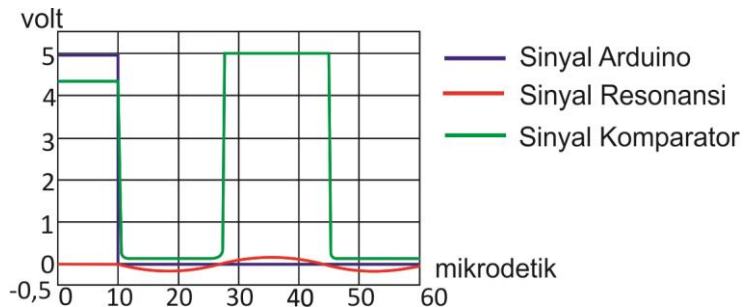


Gambar 3.3 (a) sinyal yang dibangkitkan oleh Arduino, (b) sinyal resonansi, dan (c) sinyal keluaran komparator

Cara kerja pengukuran alat

1. *probe* alat dipasang pada satu pasang fase motor
2. sinyal dibangkitkan oleh Arduino
3. terjadi resonansi dan sinyal resonansi menjadi masukan komparator
4. komparator mengubah besaran analog menjadi besaran logika
5. keluaran komparator menjadi masukan Arduino
6. selama 1 milidetik Arduino menghitung jumlah logika 1 dan 0.
7. Arduino menentukan periode 1 gelombang (logika 1 dan 0) sehingga didapatkan nilai periode dengan satuan detik
8. Arduino menentukan frekuensi dari nilai periode tersebut
9. nilai frekuensi diolah dengan persamaan 3.3 sehingga didapatkan nilai induktansi

Misal pada suatu simulasi menggunakan ISIS Proteus 8 Professional terdapat suatu induktor 30 μH untuk diuji, diketahui nilai kapasitor sebesar 1 mikroFarad dan gelombang hasil simulasi sebagai berikut,



Gambar 3.4 Grafik sinyal resonansi dan keluaran komparator

Pada gambar, 1 gelombang sinyal komparator terjadi selama 35 mikrodetik. Dengan demikian, dapat ditentukan nilai frekuensinya dengan persamaan berikut

$$F_R = \frac{1}{T} = \frac{1}{35 \times 10^{-6}} = 0,02 \times 10^6 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 F_R^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 \times (0,02 \times 10^6)^2 \times 10^{-6}} = 3,1 \times 10^{-5} \text{ H} \quad (3.5)$$

Dengan demikian, didapatkan nilai induktor sebesar 31 mikroHenry. Sedangkan pada simulasi, nilai induktor teruji adalah 30 mikroHenry. Terdapat kesalahan pembacaan 1 mikroHenry untuk simulasi terhadap perhitungan.

3.4 Pengujian Sensor Induktansi

Tabel 3.2 Pengujian sensor induktansi

Induktor (μH)	LCR meter	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
47	44,4	51,75	16,55	43,25	2,59
33	29,8	37,39	25,46	31,85	6,87
22	20,2	21,86	8,21	19,52	3,36
10	10,7	10,48	2,05	10,48	2,05
Rata-rata					3,72

Pengujian dilakukan pada induktor pabrikan dengan alat ukur LCR meter dan sensor yang dibuat. Dari pengujian kesalahan rata-rata alat adalah 3,72 % dibanding LCR meter.

3.5 Sensor untuk Mengukur Tegangan *Back Electromotive Force*

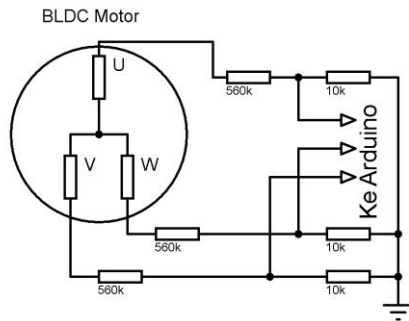
ADC Arduino mampu mengubah tegangan 0-5 volt menjadi bilangan bulat 0-1023. Dengan demikian, 1 bilangan bulat senilai dengan 0,004 volt.

Sensor untuk mengukur tegangan memanfaatkan hukum pembagi tegangan dengan dua resistor yang tersusun seri. Tegangan masukan yang diperbolehkan untuk sensor ini adalah 0 sampai 200 volt searah. Hal ini dikarenakan pembacaan ADC Arduino yang hanya mampu membaca 0 sampai 5 volt terhadap tanah.

Jumlah resistansi yang digunakan untuk sensor adalah 570 k Ω sehingga setiap 1 volt yang dibaca Arduino setara dengan 57 volt tegangan masuk ke sensor. Sebagaimana dijelaskan sebelum, bahwa Arduino akan

mengubah tegangan 0-5 volt menjadi bilangan bulat 0-1023. Dengan demikian, ketelitian sensor didapatkan 0,278 volt tegangan yang masuk ke sensor setiap nilai bilangan bulatnya. Hal ini dinyatakan dari persamaan berikut

$$\text{Faktor pengali} = \frac{5}{1023} \times \frac{560k + 10k}{10k} = 0,278 \quad (3.6)$$



Gambar 3.5 Sensor tegangan BEMF

Untuk keperluan pengukuran konstanta BEMF, Arduino tidak dapat membaca tegangan antar fase tetapi tegangan fase-tanah. Oleh karena itu, tegangan yang terbaca oleh Arduino harus dikalikan $\sqrt{3}$.

3.6 Pengujian Sensor Tegangan BEMF

Motor BLDC ini terdiri dari 3 fase, U, V, dan W, sehingga masing-masing fasenya harus diberi sensor tegangan. Dengan demikian diperlukan pengujian masing-masing sensor tegangan.

Pengujian dilakukan dengan sumber tegangan PLN 220 VAC 50 Hz, potensiometer linier 100k, dan kemudian disearahkan dengan dioda penyearah berkapasitor 680 uF 400 volt. Penyearah digunakan untuk mengubah tegangan bolak-balik sumber menjadi tegangan searah hingga 298 volt. Potensiometer berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran sehingga dapat diubah-ubah dari 0 hingga 200 volt searah sesuai kebutuhan pengujian. Dari pengujian didapatkan tabel sebagai berikut dan kesalahan rata-rata sensor tegangan fase U adalah 1,68% dibanding alat ukur digital Sanwa CD800a.

Tabel 3.3 Pengujian sensor tegangan fase U

Sumber (volt)	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
10	10,30	3,08	9,12	8,76
20	21,17	5,89	19,26	3,69
30	31,20	4,00	29,14	2,85
40	42,90	7,25	39,02	2,42
50	53,76	7,53	49,67	0,65
60	64,35	7,25	58,79	2,00
70	75,77	8,25	69,44	0,79
80	84,64	5,80	78,81	1,47
90	97,06	7,85	88,95	1,16
100	108,37	8,37	98,84	1,16
110	118,68	7,89	108,47	1,39
120	130,66	8,88	119,11	0,73
130	141,80	9,08	128,74	0,96
140	152,11	8,65	139,13	0,61
150	163,25	8,83	148,00	1,32
160	173,56	8,47	158,65	0,84
170	186,1	9,47	168,02	1,16
180	196,96	9,42	178,16	1,01
190	208,10	9,53	189,31	0,36
200	219,80	9,90	199,45	0,27
Rata-rata				1,68

Pengujian dilakukan dengan cara yang sama sebagaimana pengujian pada sensor tegangan fase U. Dari pengujian sensor tegangan untuk fase V, didapatkan rata-rata kesalahan senilai 0,92% dibanding alat ukur digital Sanwa CD800a.

Tabel 3.4 Pengujian sensor tegangan fase V

Sumber (volt)	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
10	10,58	5,87	10,64	6,41
20	20,89	4,47	20,06	0,34
30	32,03	6,79	30,00	0,01
40	42,62	6,56	39,68	0,78
50	54,04	8,09	49,62	0,75

Tabel 3.5 Pengujian sensor tegangan fase V (lanjutan)

Sumber (volt)	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
60	64,07	6,79	59,81	0,30
70	75,49	7,85	69,75	0,35
80	85,24	6,56	79,43	0,70
90	96,67	7,41	89,88	0,12
100	107,53	7,53	99,31	0,68
110	118,40	7,63	110,01	0,01
120	130,10	8,41	119,44	0,47
130	140,41	8,00	129,88	0,08
140	152,39	8,85	139,82	0,12
150	162,41	8,27	149,50	0,32
160	174,12	8,82	160,20	0,13
170	184,98	8,81	159,63	6,09
180	196,96	9,42	180,59	0,32
190	206,99	8,94	190,53	0,27
200	218,13	9,06	200,21	0,10
Rata-rata Kesalahan				0,92

Pengujian dilakukan dengan cara yang sama sebagaimana pengujian pada sensor tegangan fase U dan V. Dari pengujian sensor tegangan untuk fase W, didapatkan tabel sebagai berikut dan rata-rata kesalahan senilai 0,7% dibanding alat ukur digital Sanwa CD800a.

Tabel 3.6 Pengujian sensor tegangan fase W

Sumber (volt)	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
10	10,02	0,29	10,50	5,06
20	20,61	3,08	19,75	1,20
30	30,36	1,22	30,06	0,23
40	40,67	1,68	40,11	0,28
50	51,81	3,63	49,63	0,73
60	62,12	3,54	59,67	0,54
70	72,71	3,87	69,98	0,02
80	83,29	4,12	79,50	0,62
90	93,05	3,38	90,07	0,08
100	104,19	4,19	99,33	0,67

Tabel 3.5 Pengujian sensor tegangan fase W (lanjutan)

Sumber (volt)	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
110	113,94	3,58	109,37	0,56
120	124,80	4,00	118,89	0,92
130	135,67	4,36	129,73	0,20
140	145,26	3,75	139,51	0,34
150	156,56	4,37	149,55	0,29
160	167,43	4,64	158,81	0,74
170	178,57	5,04	169,38	0,36
180	188,88	4,93	179,69	0,17
190	201,14	5,86	191,06	0,55
200	210,05	5,02	200,57	0,28
Rata-rata kesalahan sensor				0,69

3.7 Sensor Arus Tamura L01Z

Sensor ini mengubah besaran arus yang mengalir pada penghantar menjadi besaran tegangan. Nilai arus yang dapat diukur oleh sensor ini adalah 0 sampai 150 ampere searah. Nilai arus 0 sampai 150 ampere diubah dalam bentuk tegangan 2,5 sampai 4 volt searah [9]. Dengan demikian tiap amperennya akan bernilai 0,01 volt. Penjelasan tersebut dapat dirumuskan dalam persamaan 3.5 dan 3.6.



Gambar 3.6 Sensor arus Tamura L01Z

Arduino akan mengubah tegangan 0-5 volt searah dalam bilangan bulat 0 sampai 1023. Jika tak ada arus yang melewati sensor, maka Arduino akan membaca tegangan 2,5 volt atau bilangan bulat antara 511. Dengan demikian, bilangan bulat yang terbaca Arduino harus dikurangi dengan 511 dan kemudian dikalikan dengan volt tiap bilangan bulatnya. Setelah

ditentukan tegangannya, kemudian nilai tegangan tersebut dibagi dengan 0,01 volt/ampere.

A2 adalah nilai bilangan bulat yang terbaca oleh Arduino akibat pembacaan ADC. *Int* merupakan nilai bilangan bulat hasil pengurangan A2 dengan konstanta 511.

$$Int = A2 - 511 \quad (3.7)$$

$$Arus = Int \times \frac{5}{1023} \div 0,01 \quad (3.8)$$

3.8 Pengujian Sensor Tamura L01Z

Pengujian dilakukan dengan catu daya searah digital Protek 0-30 volt dan beban resistor geser 0-25 ohm 5 A. Resistor geser diatur pada pembebanan 1 ohm, kemudian catu daya searah diubah tegangannya dari 0-5 volt. Dari pengujian didapatkan tabel sebagai berikut.

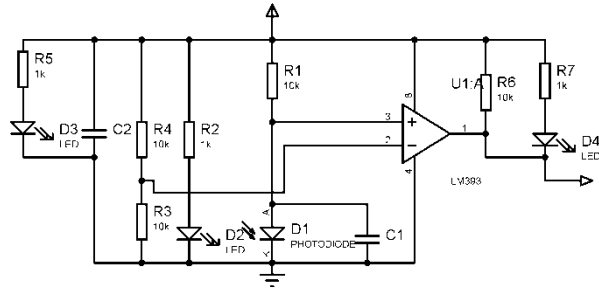
Tabel 3.7 Pengujian sensor arus Tamura L10Z

Sumber (A)	Sebelum linierisasi	% kesalahan	Setelah linierisasi	% kesalahan
1	0,97	2,2	0,88	11,8
2	1,95	2,25	2,20	10,35
3	3,42	14,03	3,09	3
4	4,39	9,97	3,97	0,67
5	5,37	7,52	4,85	2,9
Rata-rata kesalahan pengujian				5,74

3.9 Sensor untuk Mengukur Kecepatan Motor

Sensor kecepatan optik ini berbasis rangkaian komparator, pembangkit cahaya infra merah, fotodioda, dan memerlukan keping *encoder* untuk mencacah logika 0 dan 1. Dalam penelitian ini, digunakan keping *encoder* 1 lubang dan dipasang pada poros motor.

Rangkaian sensor kecepatan ini bersifat *active low*. Terdapat 2 buah resistor (R4 dan R3) yang berfungsi sebagai pembagi tegangan. Tegangan masuk pada rangkaian adalah 5 volt kemudian terbagi sama rata menjadi 2,5 volt. Tegangan 2,5 volt ini menjadi referensi bagi komparator. Hal ini sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.7.



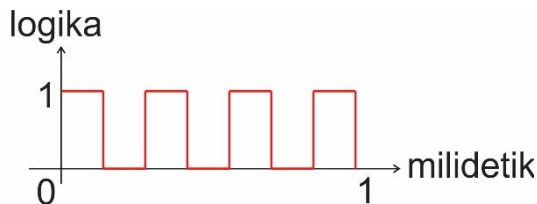
Gambar 3.7 Sensor kecepatan optik dengan LM393

Saat cahaya infra merah terhalang oleh keping *encoder*, maka fotodiode tidak menerima cahaya inframerah dan rangkaian menjadi terbuka. Keadaan ini mengakibatkan pin positif komparator menerima tegangan 5 volt yang berarti lebih besar dari tegangan referensinya. Oleh komparator, keadaan ini dikirim sebagai logika 1. Saat fotodiode menerima cahaya inframerah, maka rangkaian bersifat tertutup. Keadaan ini mengakibatkan pin positif komparator menerima tegangan 0 volt yang berarti kurang dari tegangan referensinya. Oleh komparator, keadaan ini dikirim sebagai logika 0. Saat logika 0 inilah *Light Emitting Diode* (LED) D4 menyala.

Arduino berfungsi untuk mencacah logika 1 yang terbaca dalam satu periode (1 milidetik). Pembacaan tersebut kemudian ditampilkan pada tampilan.



Gambar 3.8 Keping *encoder* 1 lubang

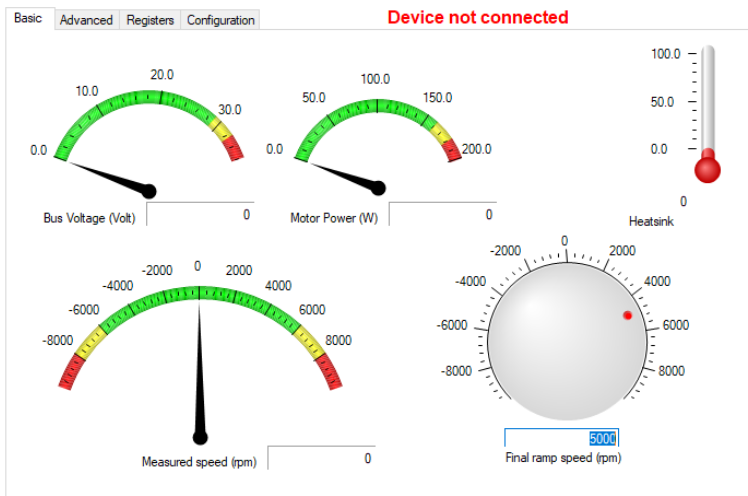


Gambar 3.9 Sinyal keluaran sensor kecepatan

3.10 Pengujian Sensor Kecepatan LM393

Sensor ini diuji dengan menggunakan motor BLDC berdaya 150 watt dan keping *encoder* 1 lubang. Motor BLDC dikendalikan dengan STM32 Nucleo Pack IHM001 dan perangkat lunak ST Motor Control Workbench v4.3. Selain mampu mengendalikan BLDC, mikrokontroler ini juga memiliki fitur membaca kecepatan motor BLDC dengan konsep tegangan BEMF terbangkit.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan kecepatan yang terbaca oleh STM32 Nucleo Pack IHM001 dengan sensor yang dirancang. Dari pengujian didapat tabel sebagai berikut dan kesalahan rata-rata sensor kecepatan senilai 5,94 % terhadap pembacaan STM32 Nucleo Pack IHM001.



Gambar 3.10 ST Motor Control Workbench v4.3

Tabel 3.8 Pengujian sensor kecepatan optik LM393

Kecepatan (RPM)	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
1000	1320	32	1035	3,5
1500	1898	26,53	1676	11,73
2000	2360	18	2294	14,7
2500	3020	20,8	2695	7,8

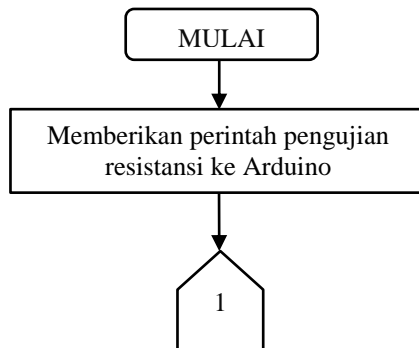
Tabel 3.8 Pengujian sensor kecepatan optik LM393 (lanjutan)

Kecepatan (RPM)	Sebelum kalibrasi	% kesalahan	Setelah kalibrasi	% kesalahan
3000	3340	11,33	3158	5,26
3500	3716	6,17	3479	0,6
4000	4145	3,62	3860	3,5
4500	4640	3,11	4336	3,64
5000	5180	3,6	4861	2,78
Rata-rata kesalahan sensor				5,94

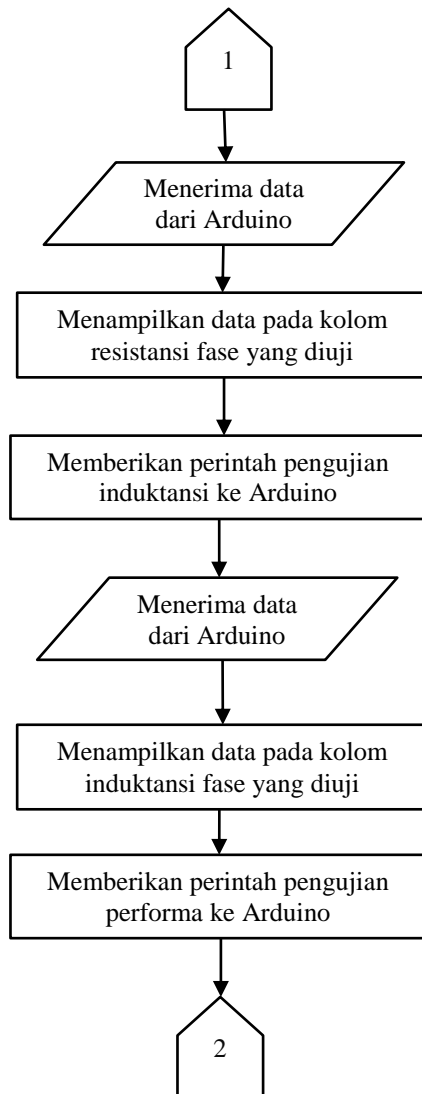
3.11 Perancangan Tampilan

Arduino sebagai mikrokontroler mengubah masukan berupa besaran fisis menjadi digital. Besaran digital ini kemudian dikirimkan melalui komunikasi *Universal Serial Bus* (USB) dengan komputer. Di sisi komputer, tampilan dibuat menggunakan LabVIEW. Pada LabVIEW terdapat blok diagram dan *front panel*. Blok diagram adalah jendela yang berisi sumber kode berbasis gambar. *Front panel* adalah jendela yang menjadi antarmuka hasil pemrograman dari jendela blok diagram LabVIEW.

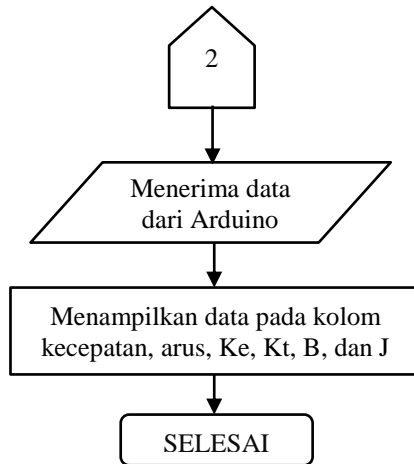
Berdasarkan diagram alur pada gambar 3.11 dibuat rancangan tampilan pada LabVIEW. Pembuatan tampilan LabVIEW terdiri dari dua jendela yaitu *front panel* dan diagram blok. Diagram blok merupakan implementasi dari diagram alur. *Front panel* merupakan hasil tampilan yang dibuat. Hasil rancangan tampilan dengan menggunakan LabVIEW ditunjukkan pada gambar 3.12.



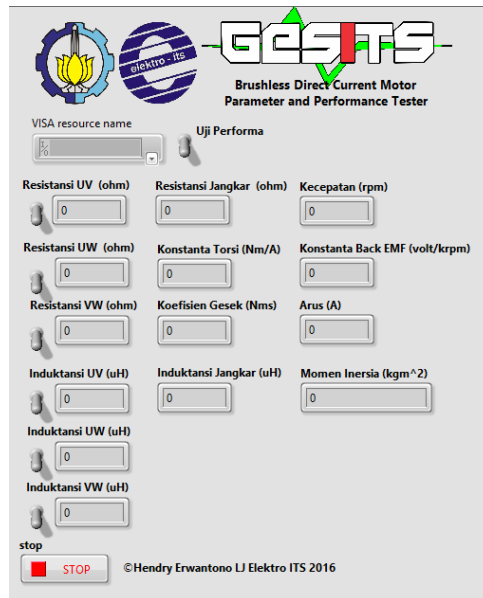
Gambar 3.11 Diagram alur perancangan tampilan dengan LabVIEW



Gambar 3.11 Diagram alur perancangan tampilan dengan LabVIEW (lanjutan)



Gambar 3.11 Diagram alur perancangan tampilan dengan LabVIEW (lanjutan)



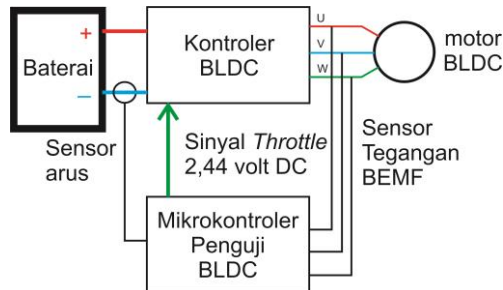
Gambar 3.12 Hasil rancangan tampilan dengan LabVIEW

BAB IV PENGUKURAN DAN PENGUJIAN

Pada bab 4 ini, dilakukan pembahasan terhadap pengujian yang dilakukan. Pengujian parameter dan performansi motor dilakukan dengan memberikan perintah uji resistansi, induktansi, dan performansi pada Arduino. Pada perangkat lunak pengembang Arduino terdapat fitur Serial Monitor yang dapat dilakukan sebagai antarmuka pengguna dengan Arduino. Pada *serial monitor* ini didapat rekam data resistansi, induktansi, arus, kecepatan, nilai konstanta BEMF, konstanta torsi, dan koefisien gesek. Pengujian ini dilakukan dengan catu daya baterai dengan tegangan 87,15 volt.

Pada penggunaannya, throttle digunakan untuk mengatur kecepatan motor oleh pengguna. Cara kerja throttle ini sama dengan potensiometer pembagi tegangan. Throttle terdiri dari 3 pin yaitu tegangan masuk, tegangan terbagi, dan titik nol. Tegangan masuk yang dicatu ke throttle adalah 3,3 volt. Tegangan terbagi merupakan tegangan yang terbaca oleh kontroler akibat hambatan putar yang dilakukan oleh pengguna. Tegangan terbaca ini bernilai 0-3,3 volt. Titik nol merupakan kutub potensial negatif rangkaian. Kondisi awal throttle berada pada titik nol sehingga motor dalam keadaan diam. Saat pengguna memutar throttle hingga posisi penuh, maka motor berada pada kecepatan maksimum. Prinsip kerja throttle ini direkayasa oleh Arduino dengan mengirimkan tegangan 2,44 volt. Dengan demikian kecepatan motor yang diharapkan saat keadaan tunak adalah 74,2% dari kecepatan maksimum sebagaimana persamaan berikut

$$\frac{2,44 \text{ volt}}{3,3 \text{ volt}} \times 100\% = 74,2\% \quad (4.1)$$



Gambar 4.1 Skema baterai, pengedali, penguji, dan motor BLDC

4.1 Prosedur Pengujian Resistansi dan Induktansi Motor

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa pengujian yang paling pertama dilakukan adalah pengujian resistansi. Berikut adalah prosedur pengujian resistansi motor

1. Kedua penjepit buaya dipasangkan pada satu pasang fase, misal U dan V.
2. Pada antarmuka, dikirimkan perintah untuk menjalankan uji resistansi.
3. Antarmuka menerima nilai resistansi.
4. Hal ini dilakukan berulang untuk kedua pasang fase lainnya.

Dari prosedur tersebut didapatkan data pada tabel sebagai berikut

Tabel 4.1 Tabel pengujian resistansi motor

Fase	Resistansi (Ω)	Pengujian dengan LCR Meter (Ω)
UV	0,142	0,142
UW	0,142	0,160
VW	0,155	0,126
Rata-rata	0,146	0,143

Pengujian selanjutnya adalah induktansi motor. Berikut adalah prosedur untuk melakukan pengujian induktansi motor

1. Kedua penjepit buaya dipasangkan pada satu pasang fase, misal U dan V.
2. Pada antarmuka, dikirimkan perintah untuk menjalankan uji induktansi.
3. Antarmuka menerima nilai induktansi.
4. Hal ini dilakukan berulang untuk kedua pasang fase lainnya.

Dari prosedur tersebut didapatkan data pada tabel berikut

Tabel 4.2 Pengujian induktansi motor

Fase	Induktansi (μH)	Pengujian dengan LCR Meter (Ω)
UV	132,48	140,2
UW	149,56	145,6
VW	177,12	123,8
Rata-rata	153,05	136,5

Berdasarkan persamaan 2.2 dan 2.3 maka didapatkan nilai resistansi stator sebesar $0,078 \Omega$ dan induktansi stator sebesar $76,52 \mu\text{H}$.

4.2 Prosedur Pengujian Konstanta BEMF Motor

Untuk mendapatkan nilai konstanta BEMF, maka motor harus dinyalakan hingga kondisi tunak kemudian ketiga fasenya tidak dicatu. Putaran sisa yang terjadi menimbulkan tegangan balik. Dengan demikian, prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut

1. Perangkat kendali, motor, dan catu daya harus dipastikan beroperasi dengan benar.
2. Pada antarmuka Arduino, diberi perintah untuk menyalakan motor dengan kecepatan referensi 74,2% dari kecepatan maksimum.
3. Setelah mencapai kondisi tunak, ketiga fase motor tidak dicatu.
4. Putaran sisa diukur dengan resistor pembagi tegangan.
5. Arduino menerima nilai tegangan dan kecepatan kemudian mengubahnya menjadi bilangan bulat.
6. Oleh Arduino, setiap data ketiga tegangan fase dirata-rata. Rata-rata ketiga fase ini dibagi dengan nilai kecepatan.
7. Arduino merekam data ini sebanyak 11 kali. Ke-11 data tersebut dijumlahkan dan dirata-rata.

Dari prosedur tersebut didapatkan tabel sebagai berikut

Tabel 4.3 Pengujian untuk mendapatkan nilai konstanta BEMF

No.	Ea (volt)	Eb (volt)	Ec (volt)	Rata-rata (volt)	Kecepatan (rpm)	Ke (volt/krpm)
1.	38,90	0,95	86,51	42,12	2558	16,46
2.	1,20	71,92	49,46	40,86	1879	21,75
3.	77,93	0,95	38,94	39,27	1879	20,90
4.	69,60	35,75	0,98	35,45	1879	18,87
5.	65,21	0,95	36,20	34,12	1879	18,16
6.	1,20	69,28	33,91	34,80	1520	22,89
7.	1,20	20,79	54,49	25,49	1520	16,77
8.	1,20	31,81	65,47	32,83	1879	17,47
9.	32,77	63,55	0,98	32,43	805	40,29
10.	1,20	24,76	54,04	26,66	1879	14,19
11.	25,31	0,95	58,15	28,14	1841	15,28
Rata-rata konstanta BEMF						20,28

Dari tabel tersebut didapatkan nilai rata-rata konstanta BEMF sebesar 20,28 volt/krpm.

4.3 Prosedur Pengujian Konstanta Torsi Motor

Konstanta torsi dapat didapatkan dari persamaan 2.9 dan nilai konstanta BEMF.

$$k_t = \frac{20,28 \times 60}{2\pi \times 1000} = 0,1936 \text{ Nm/A} \quad (4.2)$$

Dari pengujian ini, didapatkan nilai konstanta torsi senilai 0,1936 Nm/A.

4.4 Prosedur Pengujian Koefisien Gesek Motor

Dalam menentukan nilai koefisien gesek, diperlukan beberapa langkah prosedur. Prosedur yang dimaksud adalah sebagai berikut

1. Perangkat kendali, motor, dan catu daya harus dipastikan dapat beroperasi dengan benar.
2. Pada antarmuka Arduino, diberikan perintah untuk menyalakan motor dengan kecepatan referensi 74,2% dari kecepatan maksimum.
3. Pengujian ini dilakukan selama 5 detik.
4. Pada saat detik ke-4, Arduino merekam data arus dan kecepatan. Perekaman data dilakukan setiap 50 milidetik sehingga didapat 20 data.
5. Perekaman data kecepatan dinyatakan dalam satuan rad/s.

Sebagaimana persamaan 2.10, koefisien gesek didapat dari konstanta torsi dan tabel perekaman berikut

Tabel 4.4 Pengujian koefisien gesek

No.	Arus (A)	Kecepatan (rad/s)	Konstanta Torsi (Nm/A)	Koefisien Gesek (Nms)
1.	19,04	214,04	0,1936	0,0172
2.	26,10	294,71	0,1936	0,0171
3.	19,93	218,77	0,1936	0,0176
4.	5,80	335,10	0,1936	0,0033
5.	52,59	342,23	0,1936	0,0297
6.	18,60	169,89	0,1936	0,0212
7.	66,72	342,23	0,1936	0,0377
8.	0,94	214,04	0,1936	0,0008
9.	16,84	342,23	0,1936	0,0095
10.	7,56	328,28	0,1936	0,0044
11.	62,74	218,77	0,1936	0,0555

Tabel 4.4 Pengujian koefisien gesek (lanjutan)

12.	1,83	335,10	0,1936	0,0010
13.	15,07	214,04	0,1936	0,0136
14.	13,75	335,10	0,1936	0,0079
15.	1,39	214,04	0,1936	0,0012
16.	9,33	335,10	0,1936	0,0053
17.	30,52	342,23	0,1936	0,0172
18.	61,86	214,04	0,1936	0,0559
19.	12,42	342,23	0,1936	0,0070
20	26,99	209,53	0,1936	0,0249
Rata-rata				0,0174

Dari tabel 4.4 tersebut didapatkan nilai rata-rata koefisien gesek sebesar 0,0174 Nms.

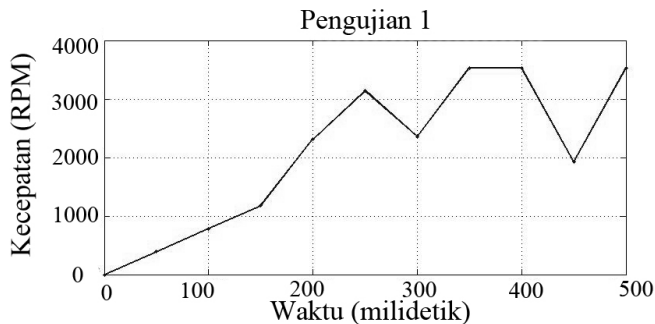
4.5 Penentuan Konstanta Waktu Mekanis

Konstanta waktu mekanis merupakan waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh 0,632 [7] dari keadaan tunak. Pada percobaan ini dilakukan 10 kali pengujian motor dengan memberikan masukan *unit step* 74,2% dari kecepatan maksimum sebagaimana didapat dari persamaan 4.1. Dari 10 kali pengujian tersebut didapatkan data sebagai berikut.

Tabel 4.5 Pengujian 1 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	392
100	784
150	1.176
200	2.307
250	3.137
300	2.352
350	3.529
400	3.529
450	1.923
500	3.529

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 350 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Untuk menentukan konstanta waktu mekanis, digunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Dari pengujian 1, tersebut waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 230 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.2.



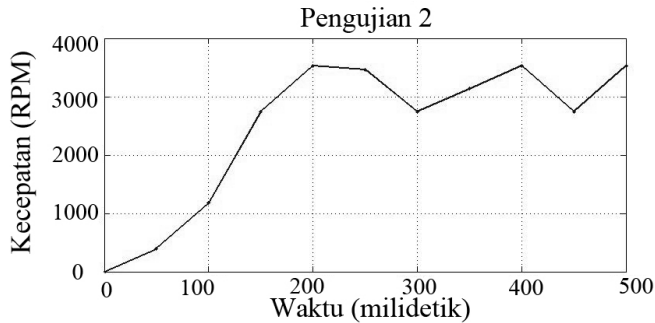
Gambar 4.2 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 1

Tabel 4.6 Pengujian 2 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	392
100	1.176
150	2.745
200	3.529
250	3.461
300	2.745
350	3.137
400	3.529
450	2.745
500	3.529

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 200 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 2 tersebut, waktu yang

dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 175 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.3.

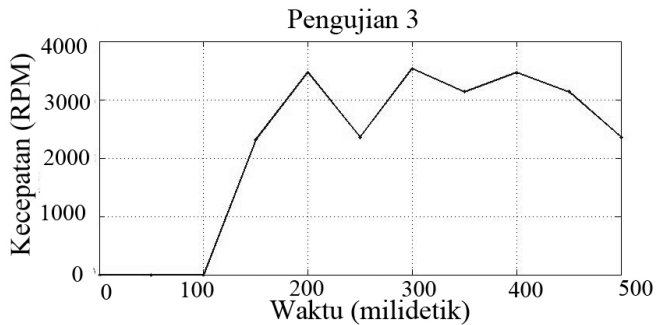


Gambar 4.3 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 2

Tabel 4.7 Pengujian 3 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	0
150	2.307
200	3.461
250	2.352
300	3.529
350	3.137
400	3.461
450	3.137
500	2.352

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 3 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 140 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.4.

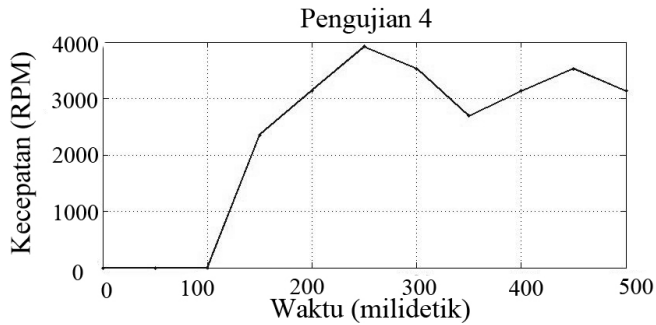


Gambar 4.4 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 3

Tabel 4.8 Pengujian 4 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	0
150	2.352
200	3.137
250	3.921
300	3.529
350	2.692
400	3.137
450	3.529
500	3.137

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 4 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 140 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.5.

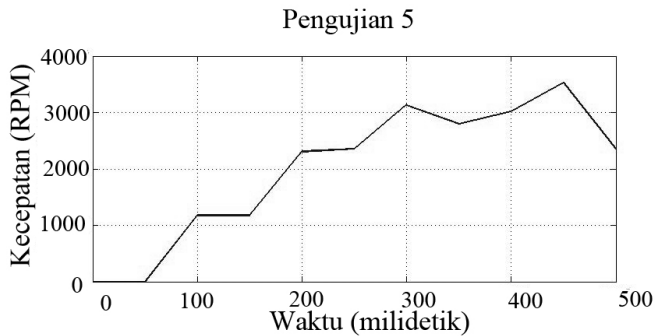


Gambar 4.5 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 4

Tabel 4.9 Pengujian 5 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	1.176
150	1.173
200	2.307
250	2.352
300	3.137
350	2.800
400	3.018
450	3.529
500	2.352

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 5 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 180 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.6.

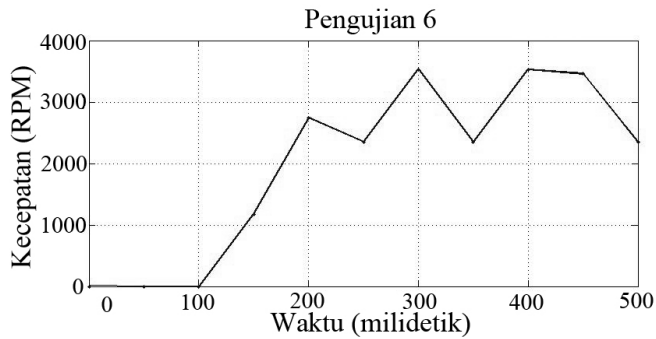


Gambar 4.6 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 5

Tabel 4.10 Pengujian 6 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	0
150	1.176
200	2.745
250	2.352
300	3.529
350	2.352
400	3.529
450	3.461
500	2.352

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 6 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 180 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.7.

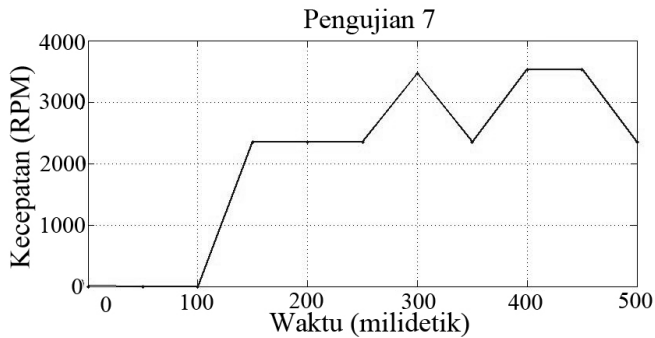


Gambar 4.7 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 6

Tabel 4.11 Pengujian 7 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	0
150	2.352
200	2.352
250	2.352
300	3.461
350	2.352
400	3.529
450	3.529
500	2.352

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 7 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 140 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.8.

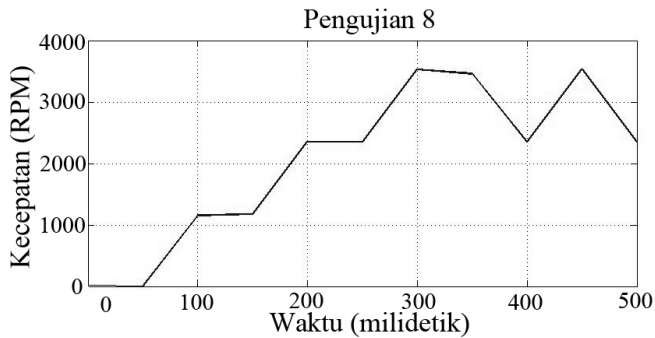


Gambar 4.8 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 7

Tabel 4.12 Pengujian 8 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	1.153
150	1.176
200	2.352
250	2.352
300	3.529
350	3.461
400	2.352
450	3.529
500	2.351

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 8 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 180 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.9

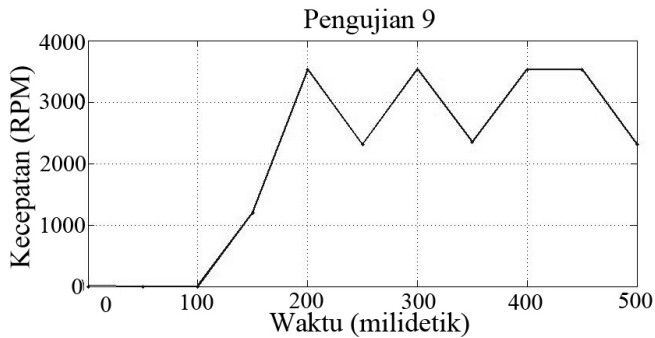


Gambar 4.9 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 8

Tabel 4.13 Pengujian 9 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	0
150	1.200
200	3.529
250	2.307
300	3.529
350	2.352
400	3.529
450	3.529
500	2.307

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 9 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 175 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.10.

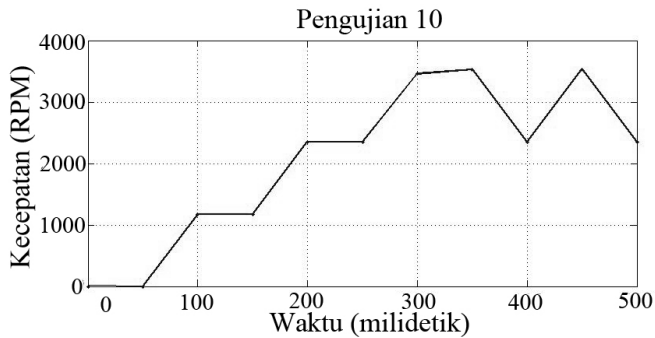


Gambar 4.10 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 9

Tabel 4.14 Pengujian 10 untuk menentukan konstanta waktu mekanis

Waktu (milidetik)	Kecepatan (rpm)
0	0
50	0
100	1.176
150	1.176
200	2.352
250	2.352
300	3.461
350	3.529
400	2.352
450	3.529
500	2.352

Motor telah mencapai keadaan tunak pada waktu 300 milidetik yaitu 3.529 rpm. Kecepatan 0,632 dari keadaan tersebut adalah 2.230 rpm. Dari pengujian 10 tersebut, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 2.230 rpm adalah 180 milidetik sebagaimana ditunjukkan gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik kecepatan terhadap waktu kondisi *transient* pengujian 10

Dari 10 pengujian untuk menentukan waktu konstanta mekanis, dapat disimpulkan berupa tabel sebagai berikut

Tabel 4.15 Kesimpulan penentuan konstanta waktu mekanis

Pengujian	Konstanta Waktu mekanis (milidetik)
1	230
2	175
3	140
4	140
5	180
6	180
7	140
8	180
9	175
10	180
Rata-rata	172

4.6 Prosedur Pengujian Momen Inersia Motor

Sebagaimana dijelaskan pada sub bab kajian pustaka dan persamaan 2.11, untuk memperoleh nilai momen inersia diperlukan nilai konstanta waktu mekanis. Konstanta waktu mekanis merupakan waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh 0,632 dari keadaan tunak. Dari pengujian

didapatkan nilai konstanta waktu mekanis rata-rata dari 10 pengujian sebagaimana pada tabel 4.15.

$$J = \frac{0,172(0,146 \times 0,0174 + 0,1936^2)}{0,146} = 0,0471 \quad (4.3)$$

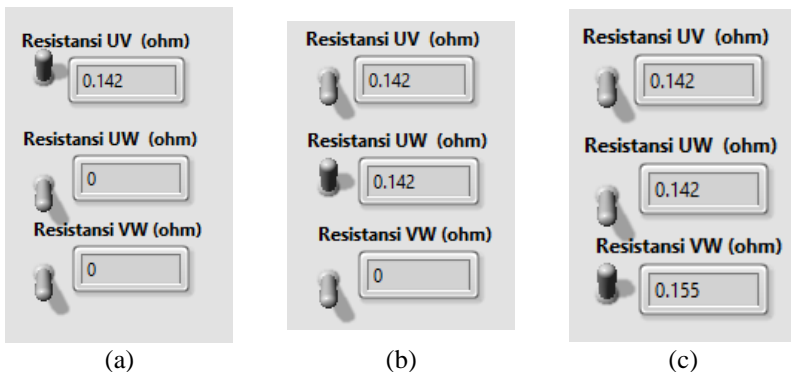
Dari pengujian didapatkan nilai momen inersia sebesar 0,0471 Kgm².

4.7 Prosedur Pengujian Tampilan

Tampilan ini berfungsi untuk menerima data berupa nilai parameter dan memberikan perintah untuk mengeksekusi program. Terdapat 3 subprogram dalam pengujian ini yaitu program untuk menguji resistansi, induktansi, dan performa. Uji resistansi terdapat 3 tombol untuk menentukan pasang fase yang akan diuji, UV, UW, dan VW. Uji induktansi terdiri dari 3 tombol untuk menentukan pasang fase yang akan diuji, UV, UW, dan VW.

Hal yang dilakukan pertama kali adalah melakukan uji resistansi dengan tampilan. Pengujian dilakukan dengan beberapa prosedur sebagai berikut

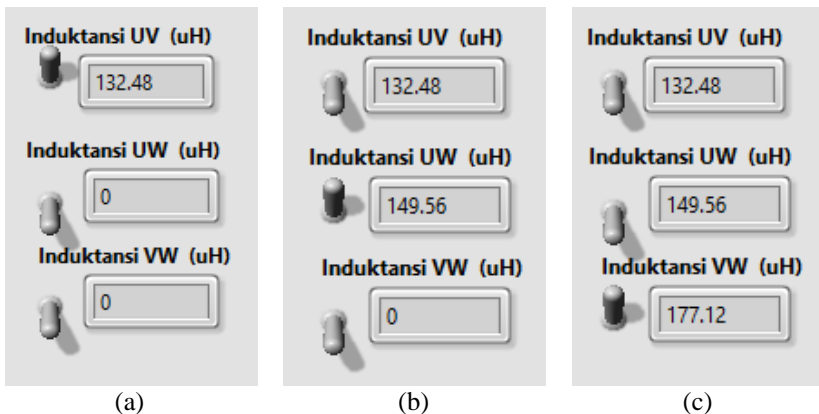
1. *Probe* alat dipasang pada kedua terminal motor, misal U dan V
2. Pada tampilan diklik pada tombol resistansi UV
3. Nilai muncul dan tombol diklik kembali ke keadaan awal.
4. Langkah tersebut diulang untuk pasang fase yang lain yaitu UW dan VW.





Gambar 4.12 Pengujian tampilan resistansi fase (a) UV, (b) UW, dan (c) VW


Pengujian selanjutnya adalah melakukan pengujian tampilan untuk uji induktansi. Prosedur yang dilakukan sama dengan melakukan uji resistansi. Hanya saja, tombol yang diklik adalah 3 tombol untuk uji induktansi UV, UW, dan VW. Dari pengujian yang dilakukan didapatkan gambar 4.13 sebagai berikut.

Pengujian selanjutnya adalah uji performa. Untuk melakukan uji performa, pada tampilan diklik tombol uji performa. Motor dinyalakan dengan masukan *unit step* selama 5 detik. Setelah 5 detik, motor tidak dikendalikan namun masih terdapat sisa putaran. Pada saat putaran sisa ini, Arduino masih merekam data tegangan balik 3 terminal dan kecepatan untuk melakukan perhitungan konstanta BEMF, konstanta torsi, dan koefisien gesek. Setelah ± 1 detik, parameter konstanta BEMF, konstanta torsi, koefisien gesek, dan momen inersia ditampilkan. Dari pengujian yang dilakukan didapatkan gambar sebagai berikut 4.14.



Gambar 4.13 Pengujian tampilan induktansi fase (a) UV, (b) UW, dan (c) VW



**Brushless Direct Current Motor
Parameter and Performance Tester**

VISA resource name Uji Performa

Resistansi UV (ohm) <input style="width: 100px;" type="text" value="0.142"/>	Resistansi Jangkar (ohm) <input style="width: 100px;" type="text" value="0.078"/>	Kecepatan (rpm) <input style="width: 100px;" type="text" value="0"/>
Resistansi UW (ohm) <input style="width: 100px;" type="text" value="0.142"/>	Konstanta Torsi (Nm/A) <input style="width: 100px;" type="text" value="0.1674"/>	Konstanta Back EMF (volt/krpm) <input style="width: 100px;" type="text" value="17.5327"/>
Resistansi VW (ohm) <input style="width: 100px;" type="text" value="0.155"/>	Koefisien Gesek (Nms) <input style="width: 100px;" type="text" value="0.0211"/>	Arus (A) <input style="width: 100px;" type="text" value="0"/>
Induktansi UV (uH) <input style="width: 100px;" type="text" value="132.48"/>	Induktansi Jangkar (uH) <input style="width: 100px;" type="text" value="76.52"/>	Momen Inersia (kgm^2) <input style="width: 100px;" type="text" value="0.0366"/>
Induktansi UW (uH) <input style="width: 100px;" type="text" value="149.56"/>		
Induktansi VW (uH) <input style="width: 100px;" type="text" value="177.12"/>		

stop

STOP

©Hendry Erwantono LJ Elektro ITS 2016

Gambar 4.14 Parameter motor BLDC pada tampilan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari pengujian yang dilakukan terhadap suatu motor *Brushless Direct Current* dengan metode yang digunakan, didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya adalah

1. Dengan kesalahan alat ukur resistansi sebesar 4,8%, rata-rata nilai resistansi 1 terminal stator motor adalah 0,078 Ω .
2. Dengan kesalahan alat ukur induktansi sebesar 3,72%, rata-rata nilai induktansi 1 terminal stator motor adalah 76,52 μH .
3. Dengan kesalahan alat ukur tegangan pada fase U sebesar 1,68%, fase V sebesar 0,92%, fase W sebesar 0,69%, dan sensor kecepatan sebesar 5,94% didapatkan koefisien BEMF sebesar 20,28 volt.
4. Berdasarkan nilai konstanta BEMF tersebut, didapatkan nilai konstanta torsi motor sebesar 0,1936 Nm/A.
5. Dari nilai konstanta torsi, rekam data kecepatan, dan arus dapat diketahui nilai koefisien gesek dari salah satu pengujian adalah 0,0174 Nms.
6. Dari pengujian didapatkan nilai momen inersia motor adalah 0,0471 Kgm^2 .

5.2 Saran

1. Penggunaan sensor kecepatan optik berbasis LM393 untuk perekaman data dengan jeda yang cepat menjadikan pembacaan kurang akurat karena pengaruh gejala *debouncing* yang kurang teredam. Sebaiknya digunakan sensor kecepatan dengan penyaring *debouncing*.
2. Penggunaan resistor sebagai sensor resistansi sebaiknya menggunakan rangkaian Jembatan Ganda Kelvin untuk mengurangi persentase kesalahan.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. J. Chapman, *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*, 4 ed. New York, : McGraw-Hill, 2005.
- [2] M. Ridwan, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC dengan ANFIS," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2018.
- [3] Padmaraja Yedamale and M. T. Inc. (2003, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. 20.
- [4] Y. B. A. Apatya, A. Subiantoro, and F. Yusivar, "Design and Prototyping of 3-Phase BLDC Motor," presented at the IEEE Conference, 2017.
- [5] J. Wu, "Parameters Estimation of BLDC Motor for Energy Storage System," in *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2012, pp. 4190-4194.
- [6] S. Mondal, A. Mitra, and M. Chattopadhyay, "Mathematical Modeling and Simulation of Brushless DC motor with Ideal Back EMF for Precision Speed Control," presented at the 2015 IEEE International Conference on Electrical, Coimbatore, India, 2015.
- [7] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 4 ed. New Jersey: Aeeizh, 2002.
- [8] d. i. F. d. Boer, G. Heins, and d. i. M. Steinbuch, "Cogging Torque Measurement, Moment Inertia, Determination and Sensivity Analysis of an Axial Flux Permanent Magnet AC Motor," 2007.
- [9] T. Coroporation, "Hall Effect Current Sensor L01Z****S05 Series," T. Corporation, Ed., ed. Japan, 2012.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

LAMPIRAN

Hasil pengujian

Parameter	Nilai	Satuan
R	0,078	Ω
L	76,52	μH
τ_m	0,172	detik
Pasang kutub	4	pasang

Hasil pengujian elektris mekanis 1

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	20,28	Volt/krpm
Kt	0,1936	Nm/A
B	0,0174	Nms
J	0,0471	Kgm^2

Hasil pengujian elektris mekanis 2

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	20,74	Volt/krpm
Kt	0,1981	Nm/A
B	0,0210	Nms
J	0,0498	Kgm^2

Hasil pengujian elektris mekanis 3

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	17,97	Volt/krpm
Kt	0,1716	Nm/A
B	0,0234	Nms
J	0,0387	Kgm^2

Hasil pengujian elektris mekanis 4

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	22,20	Volt/krpm
Kt	0,2120	Nm/A
B	0,0225	Nms
J	0,0568	Kgm ²

Hasil pengujian elektris mekanis 5

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	21,16	Volt/krpm
Kt	0,2021	Nm/A
B	0,0202	Nms
J	0,0516	Kgm ²

Hasil pengujian elektris mekanis 6

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	19,83	Volt/krpm
Kt	0,1893	Nm/A
B	0,0255	Nms
J	0,0466	Kgm ²

Hasil pengujian elektris mekanis 7

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	21,25	Volt/krpm
Kt	0,2029	Nm/A
B	0,0251	Nms
J	0,0528	Kgm ²

Hasil pengujian elektris mekanis 8

Parameter	Nilai	Satuan
Ke	20,25	Volt/krpm
Kt	0,1934	Nm/A
B	0,0167	Nms
J	0,0469	Kgm ²

Hasil pengujian elektris mekanis 9

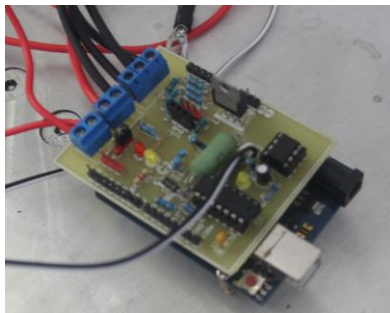
Parameter	Nilai	Satuan
Ke	19,83	Volt/krpm
Kt	0,1894	Nm/A
B	0,0179	Nms
J	0,0453	Kgm ²

Hasil pengujian elektris mekanis 10

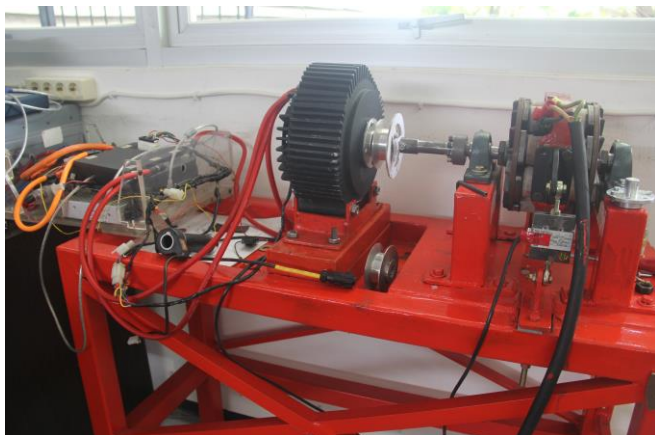
Parameter	Nilai	Satuan
Ke	19,92	Volt/krpm
Kt	0,1903	Nm/A
B	0,0178	Nms
J	0,0457	Kgm ²

Hasil pengujian dari penelitian [2]

Parameter	Nilai	Satuan
R	0,04335	Ω
L	105,2665	μH
Ke	18,935	Volt/krpm
Kt	0,180815	Nm/A
τ_m	0,15	s
B	0,016158	Nms
J	0,059009	Kgm ²
Pasang kutub	4	pasang



Rangkaian penguji motor BLDC yang terhubung dengan Arduino Uno



Modul pengujian motor BLDC



Rangkaian *driver* dan *controller* motor BLDC

BIODATA PENULIS



Nama : Hendry Erwantono
Agama : Islam
Alamat : Perumahan Graha Kembangan
Asri Kecamatan Kebomas
Kabupaten Gresik
Surel : hendry.erwantono@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

1999-2001	TK Dharma Wanita
2001-2007	SDN 3 Randu Agung
2007-2010	SMPN 1 Gresik
2010-2013	SMAN 1 Gresik
2013-2016	D3 Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2016-2018	S1 Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----